

# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

---

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

## **CALIDAD DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANO-INDUSTRIALES QUE RIEGAN EL VALLE DEL MEZQUITAL, HIDALGO, MÉXICO**

ISABEL MENDOZA SALDIVAR

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTORA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2009

---

La presente tesis titulada: **Calidad de las aguas residuales urbano-industriales que riegan el Valle del Mezquital, Hidalgo, México**, realizada por la alumna: **Isabel Mendoza Saldivar**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS  
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO \_\_\_\_\_ DR. HÉCTOR MANUEL ORTEGA ESCOBAR

ASESOR \_\_\_\_\_ DR. CARLOS RAMÍREZ AYALA

ASESOR \_\_\_\_\_ DR. VÍCTOR A. GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

ASESORA \_\_\_\_\_ DRA. NORMA E. GARCÍA CALDERÓN

ASESORA \_\_\_\_\_ DRA. AMADA LAURA REYES ORTIGOZA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Diciembre 2009

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mi agradecimiento a las siguientes personas e instituciones, que contribuyeron a la realización del presente trabajo:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) Por el financiamiento otorgado para la realización de mis estudios de postgrado

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT). Por el financiamiento otorgado para la conclusión de mis estudios de postgrado.

A mi Consejo Particular. Por la revisión y corrección del presente trabajo.

Al Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar. Por la dirección del trabajo, invaluable y permanente ayuda, dentro y fuera del ámbito de la investigación y, por la gran amistad brindada a mi persona.

Al Maestro Genaro García Nambo, por su valiosa ayuda durante la realización del trabajo.

## CONTENIDO

	Página
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	VI
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	XI
<b>RESUMEN</b> .....	VI
<b>ABSTRACT</b> .....	XI
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. OBJETIVO</b> .....	3
<b>3. HIPÓTESIS</b> .....	4
<b>4. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	5
4.1 Origen de las sales solubles en suelos y en aguas naturales.....	5
4.2 Procesos de acumulación de sales.....	8
4.3 Sales solubles en suelos, aguas superficiales, subterráneas y freáticas .....	10
4.3.1 Sales del ácido carbónico .....	10
4.3.2 Sales del ácido sulfúrico .....	12
4.3.3 Sales del ácido clorhídrico .....	13
4.4 Composición química de las aguas de suelos (extractos de saturación), aguas superficiales (ríos) y aguas de pozos .....	15
4.5 Aguas superficiales de diferentes partes del mundo.....	17
4.6 Calidad del agua de riego .....	23
4.7 Criterios que deben evaluarse en las aguas de riego .....	24
4.7.1 Criterios de salinidad .....	25
4.7.1.1 Conductividad eléctrica (CE) .....	25

	Página
4.7.1.2 Presión osmótica (PO) .....	29
4.7.1.3 Índice de salinidad efectiva (SE) .....	32
4.7.1.4 Índice de salinidad potencial (SP) .....	33
4.7.2 Criterios de sodicidad .....	34
4.7.2.1 Relación funcional porcentaje de sodio intercambiable-relación de adsorción de sodio (PSI-RAS) .....	37
4.7.2.2 Ecuación de intercambio catiónico de Gapon .....	38
4.7.2.3 Relación de adsorción de sodio original o explícita (RAS) .....	41
4.7.2.4 Relación de adsorción de sodio ajustado (RAS <sub>aj</sub> ) .....	42
4.7.2.5 Relación de adsorción de sodio corregido (RAS°) .....	51
4.7.2.6 La fuerza iónica como parámetro fundamental para calcular el coeficiente de actividad de cada ion en una solución salina .....	53
4.7.2.7 Sales hipotéticas .....	54
4.7.2.8 Problemas de infiltración de suelos bajo riego .....	57
4.7.2.9 Carbonato de sodio residual (CSR) .....	60
4.7.3 Criterios de toxicidad .....	70
4.8 Descripción de la zona geográfica de estudio .....	74
4.8.1 Área geográfica .....	74
4.8.2 Clima .....	74
4.8.3 Geología .....	76
4.8.4 Hidrología .....	77
4.8.5 Almacenamiento .....	78
<b>5. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>80</b>
5.1 Ubicación de los sitios de muestreo .....	80
5.2 Determinaciones físico-químicas .....	80
5.3 Directrices sobre la calidad del agua .....	84
5.4 Análisis estadístico .....	86
5.5 Formas de comprobar los análisis químicos de las aguas .....	87

	Página
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	91
6.1 Localización geográfica del área de estudio .....	92
6.2 Composición iónica de las aguas residuales .....	97
6.3 Comprobación de la exactitud de los datos analíticos .....	112
6.4 Distribución de cationes y aniones.....	114
6.5 Distribución de frecuencias de los datos analíticos.....	119
6.6 Clasificación de las aguas residuales con base en la salinidad.....	124
6.6.1 Conductividad eléctrica.....	124
6.6.2 Presión osmótica .....	126
6.6.3 Índice de salinidad efectiva.....	129
6.6.4 Índice de salinidad potencial.....	130
6.7 Clasificación de las aguas residuales con base en la sodicidad.....	136
6.7.1 Porcentaje de sodio intercambiable-relación de adsorción de sodio (PSI-RAS).....	136
6.7.2 Clasificación de las aguas residuales de acuerdo con Richards, 1973 ....	138
6.7.3 Determinación de las sales hipotéticas.....	150
6.7.4 Clasificación de las aguas residuales con base en el peligro de disminución de la infiltración .....	155
6.7.5 Carbonato de sodio residual.....	164
6.8 Clasificación de las aguas residuales con base en la toxicidad específica de iones .....	167
6.8.1 Boro (B) .....	167
6.8.2 Fósforo .....	173
 <b>7. CONCLUSIONES</b> .....	 178
 <b>8. RECOMENDACIONES</b> .....	 180
 <b>9. LITERATURA CITADA</b> .....	 181

## ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Solubilidad del carbonato de magnesio en agua a una temperatura de 18°C, para diferentes presiones parciales de CO <sub>2</sub> . .....	10
Cuadro 2. Solubilidad del carbonato de calcio de acuerdo con la cantidad del CO <sub>2</sub> en el aire, a una temperatura de 16°C. ....	11
Cuadro 3. Solubilidad del carbonato de calcio con una presión parcial de CO <sub>2</sub> de 0.00032 atm.....	11
Cuadro 4. Características químicas de los extractos de saturación de suelos salinos y sodicos, aguas de pozos y aguas de ríos que han sido analizados por el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos. ....	16
Cuadro 5. Calidad de las aguas superficiales (ríos), que son utilizadas para riego.....	20
Cuadro 6. Composición química de algunas aguas fluviales usadas para riego en el Oeste de los Estados Unidos. ....	21
Cuadro 7. Análisis químico de las aguas de riego de varias fuentes en Kinnaur región de Himachal Pradesh, India. ....	22
Cuadro 8. Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con su salinidad efectiva.....	33
Cuadro 9. Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con su salinidad potencial.....	33
Cuadro 10. Calculo de los valores de pH <sub>c</sub> teórico de las aguas de riego.....	47

Cuadro 11.	Concentración de calcio ( $\text{Ca}^{\circ}$ ) en el agua del suelo, contenido en el suelo cerca de la superficie, que resultaría de regar con aguas de determinado valor $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ y conductividad del agua de riego (CE) <sup>a,b</sup> .....	52
Cuadro 12.	Parámetros individuales del tamaño de los iones ( $a_i$ ), expresados en unidades de Angstrom (Å) para ser introducidos en la ecuación de Debye y Hückel para el cálculo de los coeficientes de actividad de cualquier ion. ....	54
Cuadro 13.	Valores de $s_k$ para sales hipotéticas de diferentes tipos de valencia. ....	56
Cuadro 14.	Influencia de los cationes adsorbidos en las diferentes propiedades físicas de los suelos. ....	58
Cuadro 15.	Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con el carbonato de sodio residual. ....	64
Cuadro 16.	Composición química de aguas para riego que se experimentaron en un suelo franco Hanford con diferentes números de riegos. ....	65
Cuadro 17.	Composición química de aguas de riego. ....	66
Cuadro 18.	Porcentaje de sodio intercambiable en suelos con rotación de cultivo algodón-trigo y en donde se aplicaron las siguientes aguas de riego AC, AS <sub>1</sub> , AS <sub>2</sub> , AS <sub>3</sub> , AS <sub>4</sub> , AS <sub>5</sub> , AS <sub>6</sub> y AS <sub>7</sub> . ....	66
Cuadro 19.	Composición química de aguas de riego. ....	67
Cuadro 20.	Porcentaje de sodio intercambiable en suelos donde se alterno el riego con aguas sódicas y aguas de canal en cultivos de girasol ( <i>Helianthus annuus</i> L.) durante seis años.....	67
Cuadro 21.	Composición química de aguas de riego. ....	68



Cuadro 22.	Sodificación de los suelos debido a los efectos de aguas sódicas con diferentes cantidades de carbonato de sodio residual. Cultivo Palmarosa ( <i>Cymbopogon martínni</i> ). .....	68
Cuadro 23.	Sodificación de los suelos debido a los efectos de aguas sódicas con diferentes cantidades de carbonato de sodio residual. Cultivo Lemongrass ( <i>Cymbopogon flexuosus</i> ). .....	69
Cuadro 24.	Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con el contenido de boro. ....	72
Cuadro 25.	Métodos analíticos utilizados para caracterizar las aguas residuales.....	83
Cuadro 26.	Lineamientos para evaluar la calidad del agua para riego. ....	85
Cuadro 27.	Localización geográfica de los sitios de muestreo de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. ....	93
Cuadro 28.	Localización geográfica de los sitios de muestreo de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. ....	95
Cuadro 29.	Composición iónica de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. ....	98
Cuadro 30.	Composición iónica de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. ....	105
Cuadro 31.	Factores de conductividad eléctrica de los iones que generalmente se encuentran en las agua naturales. ....	112

Cuadro 32.	Composición del contenido de sodio en los sitios de muestreo del cauce del río Tula que corresponde a los Muestreros 1 y 2.....	117
Cuadro 33.	Clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, de acuerdo con su salinidad efectiva.....	129
Cuadro 34.	Clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán de acuerdo con su salinidad potencial.....	131
Cuadro 35.	Clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1, de acuerdo con su salinidad efectiva y salinidad potencial. Buena (B); Condicionada (C) y No recomendable (NR).....	132
Cuadro 36.	Clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2, de acuerdo con su salinidad efectiva y salinidad potencial. Buena (B); Condicionada (C) y No recomendable (NR).....	134
Cuadro 37.	Clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, de acuerdo con las diferentes formulaciones de la relación de adsorción de sodio de los Muestreros 1 y 2.....	138
Cuadro 38.	Valores de las distintas formulaciones de la relación de adsorción de sodio, de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. ....	140
Cuadro 39.	Valores de las distintas formulaciones de la relación de adsorción de sodio, de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. ....	142

Cuadro 40.	Composición química de muestras de aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. ....	150
Cuadro 41.	Clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, con base en el peligro de disminución de la infiltración de los Muestreos 1 y 2.....	157
Cuadro 42.	Clasificación del contenido de Boro de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. Buena (B); Condicionada (C) y No recomendable (NR).....	170
Cuadro 43.	Clasificación del contenido de Boro de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. Buena (B); Condicionada (C) y No recomendable (NR).....	171
Cuadro 44.	Clasificación del contenido de fosfatos determinados como ortofosfatos ( $PO_4^{3-}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. Dentro de los niveles recomendados ( $\checkmark$ ); Fuera de los niveles recomendados (X). ....	176
Cuadro 45.	Clasificación del contenido de fosfatos determinados como ortofosfatos ( $PO_4^{3-}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. Dentro de los niveles recomendados ( $\checkmark$ ); Fuera de los niveles recomendados (X). ....	177

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Diagrama para la clasificación de las aguas de riego.....	36
Figura 3. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio. ....	59
Figura 4. Localización geográfica de los sitios de muestreo de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. ....	81
Figura 5. Localización geográfica de los sitios de muestreo de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. ....	82
Figura 6. Relación conjunta de la conductividad eléctrica experimental ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y conductividad eléctrica teórica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán. a. Muestreo 1 y b. Muestreo 2. ....	113
Figura 7. Composición iónica de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1.....	115
Figura 8. Composición iónica de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2.....	118
Figura 9. Distribución de frecuencias con respecto a la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1.....	120
Figura 10. Distribución de frecuencias con respecto a la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2.....	121
Figura 11. Distribución de frecuencias con respecto al residuo seco evaporado ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1.....	122

Figura 12. Distribución de frecuencias con respecto al residuo seco evaporado ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2.....	123
Figura 13. Relación entre la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y la concentración de sólidos totales ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán. a. Muestreo 1 y b. Muestreo 2. ....	125
Figura 14. Relaciones entre: conductividad eléctrica ( $\text{mS cm}^{-1}$ ) y presión osmótica (MPa); conductividad eléctrica ( $\text{mS cm}^{-1}$ ) y concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ); concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) y presión osmótica (MPa), de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1.....	127
Figura 15. Relaciones entre: conductividad eléctrica ( $\text{mS cm}^{-1}$ ) y presión osmótica (MPa); conductividad eléctrica ( $\text{mS cm}^{-1}$ ) y concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ); concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) y presión osmótica (MPa), de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2.....	128
Figura 16. Relación PSI-RAS para las expresiones: a y b. PSI-RAS del Muestreo 1 y 2 respectivamente; c y d) PSI-RAS° del Muestreo 1 y 2 respectivamente y; e y f) PSI-RAS <sub>aj</sub> del Muestreo 1 y 2 respectivamente, de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán. ....	137
Figura 17. Diagrama de clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. RAS original-CE.....	144
Figura 18. Diagrama de clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. RAS corregido-CE. ....	145
Figura 19. Diagrama de clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. RAS ajustado-CE.....	146

Figura 20.	Diagrama de clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. RAS original-CE.....	147
Figura 21.	Diagrama de clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. RAS corregido-CE .....	148
Figura 22.	Diagrama de clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. RAS ajustado-CE.....	149
Figura 23.	Relación entre la fuerza iónica de los iones individuales con la fuerza iónica de las sales hipotéticas de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán. a. Muestreo 1 y b. Muestreo 2. ....	152
Figura 24.	Concentración de las sales hipotéticas ( $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. ....	153
Figura 25.	Concentración de las sales hipotéticas ( $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. ....	154
Figura 26.	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. RAS original-CE.....	158
Figura 27.	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. RAS corregido-CE. ....	159
Figura 28.	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. RAS ajustado-CE.....	160

Figura 29.	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. RAS original-CE .....	161
Figura 30.	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. RAS corregido-CE .....	162
Figura 31.	Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. RAS ajustado-CE .....	163
Figura 32.	Distribución de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1, de acuerdo con el contenido de carbonato de sodio residual $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ( $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$ ) .....	165
Figura 33.	Distribución de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2, de acuerdo con el contenido de carbonato de sodio residual $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ( $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$ ) .....	166
Figura 34.	Concentración de Boro B ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. ....	168
Figura 35.	Concentración de Boro B ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. ....	169
Figura 36.	Concentración de fosfatos $\text{PO}_4^{3-}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. ....	174
Figura 37.	Concentración de fosfatos $\text{PO}_4^{3-}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. ....	175

# CALIDAD DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANO-INDUSTRIALES QUE RIEGAN EL VALLE DEL MEZQUITAL, HIDALGO, MEXICO

Isabel Mendoza Saldivar, Dra.  
Colegio de Postgraduados, 2009

En la actualidad se ha usado prácticamente toda agua disponible para satisfacer los requerimientos de humedad de los diferentes cultivos que activamente se explotan en la agricultura bajo riego. Cada vez más se utilizan hasta el límite las aguas superficiales y subterráneas de la más variada composición química y concentración de sales. En México, se riegan aproximadamente 180 000 ha en diferentes valles intermontanos del Valle del Mezquital con aguas residuales urbano-industriales que derivan de la zona metropolitana del Valle de México, prácticamente sin ningún tratamiento. En este trabajo de investigación se analizan y discuten los efectos de los elementos inorgánicos que afectan la calidad del agua de riego residual urbano-industrial de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, que riegan el Valle del Mezquital, Hidalgo. Se analizan los problemas de salinidad y sodicidad de estas aguas, así como los contenidos de boro y ortofosfatos. Se encontró que los valores de la presión osmótica de las aguas residuales variaron como sigue: 16-24 kPa para fuentes de agua de manantiales y 55-186 kPa para las aguas residuales urbano-industriales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán. La concentración total electrolítica de estas aguas varió de la siguiente manera: 135-4612  $\mu$  S  $\text{cm}^{-1}$ . Altos niveles de sodio intercambiable propician la dispersión de las arcillas y afectan la infiltración del agua en los suelos. Los efectos de la sodicidad se evalúan con la relación de adsorción de sodio (RAS). Para ello se evaluaron las siguientes formulaciones  $\text{RAS}_{\text{or}}$ ,  $\text{RAS}_{\text{aj}}$  y  $\text{RAS}^0$ . Se calcularon las sales hipotéticas en estas aguas y la composición salina resultó ser la siguiente:  $\text{NaCl} > \text{NaHCO}_3 > \text{Mg}(\text{HCO}_3)_2 > \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 > \text{MgSO}_4$ . Estas aguas son: sódico-clorhídrico-bicarbonatadas. Los contenidos de boro fueron: 0.03-8.77  $\text{mg L}^{-1}$ . Los contenidos de ortofosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) fueron: 0.05-34.61  $\text{mg L}^{-1}$ .

Palabras clave: Salinidad, Sodicidad, RAS, PSI, CSR



## QUALITY OF URBAN-INDUSTRIAL RESIDUAL WATERS USED FOR IRRIGATION IN THE VALLE DEL MEZQUITAL, HIDALGO, MEXICO

Nowadays, practically any available water is being used to satisfy the moisture requirements of the different crops that are actively being grown under irrigation conditions. Surface and underground waters are ever more being used to exhaustion, regardless of their varied chemical composition or concentration of salts. In Mexico, approximately 180 000 ha in different mountain valleys in the Valle del Mezquital are being irrigated with urban-industrial residual waters from the metropolitan zone of the Valle de Mexico, with practically no treatment. In the present research work are analyzed and discussed the effects of the inorganic elements that affect the quality of the urban-industrial residual waters used for irrigation in the Valle del Mezquital, Hidalgo, coming from the Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán water basin. Problems of salinity and sodicity in these waters are analyzed, as well as the contents of boron and orthophosphates. The values of osmotic pressure of the residual waters were found to vary as follows: 16-24 kPa for spring waters and 55-186 kPa for urban-industrial residual waters from the Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán water basin. The total electrolytic concentration of these waters varied as follows: 135-4612  $\mu$  S  $\text{cm}^{-1}$ . High levels of exchangeable sodium favor the dispersion of clays and affect water infiltration into the soil. The effects of sodicity are evaluated with the sodium adsorption ratio (SAR). To do this, the following formulas were evaluated:  $\text{SAR}_{\text{or}}$ ,  $\text{SAR}_{\text{aj}}$ , and  $\text{SAR}^{\circ}$ . Hypothetical salts were evaluated for these waters, and the saline composition turned out to be:  $\text{NaCl} > \text{NaHCO}_3 > \text{Mg}(\text{HCO}_3)_2 > \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 > \text{MgSO}_4$ . The waters are: sodic-chlorhydric-bicarbonated. Boron contents were: 0.03-8.77  $\text{mg L}^{-1}$ . Orthophosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) contents were: 0.05-34.61  $\text{mg L}^{-1}$ .

Key words: Salinity, Sodicity, SAR, ESP, RSC

## 1. INTRODUCCIÓN

En la práctica agrícola de las zonas áridas y semiáridas, se ha utilizado agua de riego con la finalidad de asegurar los rendimientos de diferentes cultivos agrícolas. Las aguas de ríos son almacenadas en diferentes embalses construidos en las partes altas para regar los valles costeros y continentales aguas abajo. La superficie que se riega con aguas superficiales y subterráneas en el mundo representa 13% del total de la superficie que se dedica a la agricultura<sup>122</sup>. Es así que, los sistemas de irrigación han permitido reducir la dependencia de la agricultura del agua de lluvia, y creado la posibilidad de sostener una aceptable productividad agrícola, gracias a la utilización del agua de riego almacenada en grandes y pequeños embalses y al agua de origen subterráneo.

La agricultura bajo riego se ha desarrollado muy rápidamente, lo que ha propiciado que las fuentes de agua de fácil acceso como las aguas fluviales, de manantiales y subterráneas, se estén utilizando hasta el límite de sus cantidades disponibles, y como consecuencia en la actualidad se presenta un problema de escasez de fuentes de agua de buena calidad para satisfacer las necesidades de sostener altos rendimientos de los cultivos agrícolas.

Para atender el problema de escasez de agua se han planteado diversas alternativas de uso de diferentes aguas de riego, que comprenden desde la optimización de fuentes de agua de buena calidad mediante el establecimiento de riegos presurizados, hasta la utilización de fuentes de agua no convencionales como el empleo de aguas residuales urbano-industriales y aguas de drenaje agrícola de diferentes distritos de riego. El agua de drenaje agrícola se utiliza actualmente mezclada en diferentes proporciones con agua de riego de buena calidad.

La reutilización en la agricultura de aguas residuales tanto domésticas como urbano-industriales se ha considerado como benéfica en el manejo de cultivos agrícolas debido a los contenidos de nitrógeno y fósforo, ya que esto puede ayudar a reducir los requerimientos en fertilizantes comerciales por los cultivos. Sin embargo, cabe señalar que el uso en el riego de cultivos agrícolas con aguas residuales lleva en forma inherente tres tipos de problemas: 1. Acumulación de sales solubles en los suelos; 2. Desarrollo de procesos de sodicidad en suelos agrícolas; y 3. La acumulación de metales pesados.

Durante la caracterización físico-química de las aguas, en especial de aguas residuales, es prominente determinar la concentración total de sales solubles y sus composiciones iónicas. Un parámetro fundamental que debe determinarse en la evaluación del agua de riego, es la relación de adsorción de sodio (RAS), así como el parámetro de EATON llamado carbonato de sodio residual (CSR). En aguas residuales, en algunos instantes las concentraciones de iones de calcio se reducen prácticamente al mínimo, condición en la que los procesos de hidrólisis son prácticamente predominantes.

La caracterización completa de las aguas residuales del Valle del Mezquital derivadas de la zona urbano-industrial de la Ciudad de México, que fluyen por la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán que riegan diferentes valles intermontanos del Valle del Mezquital, consistió en: 1. Determinación de las concentraciones totales de sales solubles asociadas con sus valores de presión osmótica; 2. Determinación de la relación de adsorción de sodio en sus diferentes formulaciones; 3. Determinación del carbonato de sodio residual; y 4. Determinación de las sales hipotéticas y fuerza iónica de los diferentes iones en las soluciones.

## 2. OBJETIVO

Caracterizar las propiedades físico-químicas de las aguas residuales urbano-industriales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, que riegan el Valle del Mezquital, Hidalgo, mediante la estimación de parámetros como: a. Concentración total de sales electrolíticas; b. Presión osmótica; c. Relaciones de adsorción de sodio o  $\frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}}$  bajo diferentes conceptualizaciones; d.

Evaluaciones del parámetro de Eaton del carbonato de sodio residual (CSR); e. Índices de salinidad efectiva y salinidad potencial; y f. Sales hipotéticas.

### **3. HIPÓTESIS**

Con los valores estimados de distintos índices o parámetros de calidad de las aguas residuales para riego, se conocerá la magnitud de los peligros de salinización y de sodificación que estas aguas residuales a través de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, desarrollan en los suelos de los valles intermontanos del Valle del Mezquital, Hidalgo.

## 4. REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1 Origen de las sales solubles en suelos y en aguas naturales

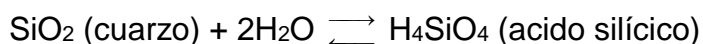
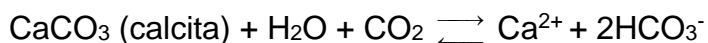
Las fuentes principales de sales en suelos y en aguas de riego, es el intemperismo geoquímico permanente sobre las rocas que se encuentran en los espesores superficiales de la corteza terrestre y que tiene lugar durante toda la longitud de tiempo geológico. Este proceso de intemperismo elemental representa un eslabón entre el intercambio geoquímico de materia entre continentes y océanos<sup>75</sup>.

La mayoría de rocas que conforman la corteza terrestre se han formado bajo condiciones de altas temperaturas y presiones. Los diferentes cristales que constituyen estas rocas no son estables cuando estos minerales se encuentran expuestos bajo condiciones atmosféricas. Por lo tanto, el intemperismo es un proceso espontáneo que transforma a los minerales primarios en otros minerales que son más estables en la superficie de la corteza terrestre. Los agentes que están involucrados en el intemperismo geoquímico son: a. El agua de lluvia; b. El oxígeno; c. El bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); d. El metano (CH<sub>4</sub>); y e. El ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S).

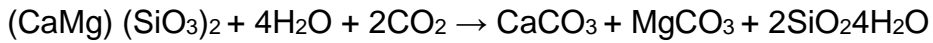
La materia orgánica (MO) es un agente reductor y también una fuente de ácidos orgánicos que promueven el intemperismo y la migración de cationes en forma de quelatos. En general, por medio de los efectos de agentes del intemperismo, los minerales primarios se transforman en especies solubles, de acuerdo con el esquema siguiente:

Minerales → Especies solubles

Ejemplos de reacciones químicas del intemperismo:



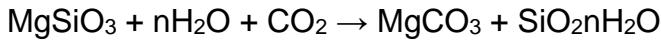
Intemperismo de silicatos de calcio y de magnesio:



Intemperismo de aluminosilicatos que contienen calcio:



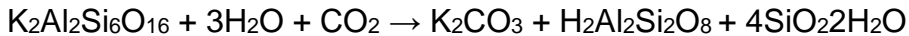
Intemperismo de silicatos magnésicos:



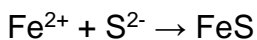
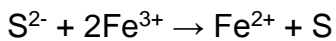
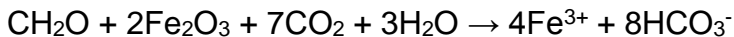
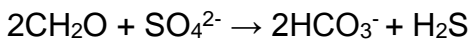
Intemperismo de aluminosilicatos<sup>146</sup> que contienen sodio:



Intemperismo de aluminosilicatos que contienen potasio:



Procesos de reducción de nitratos, sulfatos y óxidos de hierro debido a la actividad biológica de microorganismos, con participación de la materia orgánica (MO). Aquí el  $\text{CH}_2\text{O}$  representa a la materia orgánica.



Como consecuencia de esto en todas las reacciones de procesos de reducción se forman bicarbonatos. Estos procesos se presentan con mucha intensidad en las aguas residuales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán que riegan los suelos del Valle del Mezquital, estado de Hidalgo.

En síntesis, sobre el origen de sales solubles que salinizan los suelos y espesores subyacentes, se debe señalar lo siguiente:

1. Las fuentes primarias de sales solubles en la corteza terrestre son:
  - a) Emanaciones gaseosas volcánicas y plutónicas (lavas, fumarolas y magma) y productos de sus cambios y reacciones físico-químicas.
  - b) Sales y gases que se encuentran solubilizados en fuentes termales.
  - c) Productos de oxidación de algunos elementos de la atmósfera y de algunos de sus gases.
  - d) Productos solubles derivados del intemperismo de rocas cristalinas.
  
2. Durante estos procesos, los productos gaseosos solubles se presentan en forma de elementos (S, Cl) que se oxidan posteriormente o se solubilizan en las aguas.
  - a) Óxidos ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ), que se solubilizan en las aguas y se transforman posteriormente en ácidos, por lo que estos compuestos reaccionan con diferentes rocas y se asocian con cationes alcalinos y alcalino-térreos.
  - b) Ácidos ( $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ )
  - c) Sales ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ )
  
3. La atmósfera es la fuente primaria de sales de los ácidos nítrico, nitroso y carbónico.
  
4. Una fuente fundamental de todos los tipos actuales de acumulaciones salinas, es el intemperismo de rocas cristalinas y que dan lugar a carbonatos, sulfatos, cloruros y boratos<sup>75</sup>.



## **4.2 Procesos de acumulación de sales**

Casi todos los ácidos conocidos forman diferentes sales. En los suelos se encuentran sales solubles en diferentes cantidades que varían de acuerdo con los diferentes procesos de acumulación de sales en suelos y en aguas<sup>75,101</sup>. En la geografía y geoquímica de procesos de acumulación de sales solubles en suelos y aguas residuales es necesario diferenciar los siguientes ciclos de acumulación de sales.

### **Ciclos continentales**

Estos ciclos están relacionados con el movimiento, redistribución y acumulación de sales: carbonatos, bicarbonatos, cloruros y sulfatos, éstas son las regiones interiores sin drenaje de los continentes y cuencas endorreicas. En función de las sales que se acumulan en suelos y en aguas como productos del intemperismo, y durante la formación de los suelos en territorios que se han formado en rocas volcánicas o que están relacionadas con la redistribución de sales que se han acumulado en los espesores de rocas sedimentarias que contienen sales solubles, los ciclos continentales se derivan en: a. ciclos primarios, y b. ciclos secundarios.

### **Ciclos que se pueden denominar como limítrofes a los mares**

Éstos están relacionados con la acumulación de sales, fundamentalmente de cloruros de sodio en las partes bajas del continente que limitan con el mar y en las orillas de pequeños golfos.

### **Ciclos deltaicos**

Estos numerosos ciclos tienen gran importancia para el hombre, ya que desde tiempos muy antiguos los deltas de ríos se utilizan en el riego, como los de los ríos Amu-darya, Tigres, Éufrates, Nilo y río Colorado, etc.

Se caracterizan por conjugar procesos que involucran el movimiento, redistribución y acumulación de sales traídas desde el continente por los ríos y por el flujo de aguas freáticas, por sales que ingresan en diferentes tiempos de los mares.

### **Ciclos artesianos**

Estos ciclos se deben a la evaporación de aguas subterráneas que ascienden a la superficie a través de fallas tectónicas y estructuras destruidas. Son aguas sometidas a subpresión. Un ejemplo de ciclos artesianos son las áreas deprimidas de la región de El Salvador en el Valle del Mezquital, estado de Hidalgo, México.

### **Ciclos antropogénicos**

Estos ciclos se deben a errores del hombre en su actividad productiva por el desconocimiento de las leyes de acumulación de sales<sup>60</sup>. Como ejemplos de acumulación de sales solubles en suelos y aguas freáticas debido a la actividad productiva del hombre, están los siguientes: a. Salinización de suelos bajo riego debido al ascenso de niveles freáticos; esto se observa cuando se aplican a los suelos grandes láminas de riego >1 m al año; como ha ocurrido en muchos distritos de riego de México, en particular en el Valle del Mezquital donde se riega con laminas >10 m al año; b. Salinización de pastizales por su mala explotación; y c. Al riego con aguas de elevada concentración salina sin conocer y observar las concentraciones óptimas del agua y por desconocer los procesos involucrados en su utilización para regar cultivos agrícolas.

Desde el punto de vista hidrológico, la acumulación de sales ocurre en regiones de drenaje restringido, y cuando el balance de aguas freáticas es regulado por la evaporación y la transpiración y no por el ingreso de aguas freáticas a la zona de acumulación<sup>91</sup>.

### 4.3 Sales solubles en suelos, aguas superficiales, subterráneas y freáticas

Las sales solubles más importantes<sup>75</sup> que se encuentran en suelos y aguas de zonas áridas y semiáridas son:

#### 4.3.1 Sales del ácido carbónico

##### Carbonatos

Las sales del ácido carbónico se encuentran en suelos, aguas freáticas de zonas áridas y semiáridas, e inclusive en estepas boscosas. El efecto de estas sales depende de su composición, cantidad de bicarbonatos y carbonatos de sodio que se acumulan en suelos, aguas freáticas y superficiales, y en los niveles de solubilidad de las diferentes sales del ácido carbónico.

##### Carbonato de magnesio

Se caracteriza por tener mayor solubilidad que el carbonato de calcio (Cuadro 1)<sup>75</sup>. En presencia del ácido carbónico, hay formación de bicarbonatos de magnesio, la solubilidad del  $MgCO_3$  fuertemente aumenta. Como el carbonato de magnesio es una sal de base fuerte y de un ácido débil, en el proceso de hidrolisis la solución que contiene iones de bicarbonato y iones de magnesio, tiene valores de pH altos (9-10).

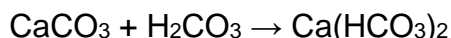
Cuadro 1. Solubilidad del carbonato de magnesio en agua a una temperatura de 18°C, para diferentes presiones parciales de  $CO_2$ .

Presiones parciales de $CO_2$ (atm)	0.005	0.001	0.01	0.1	1.0	5.0	10.0
Contenido de carbonato de magnesio ( $g L^{-1}$ )	2.51	3.11	6.04	12.2	25.8	46.0	59.2

Fuente: Kovda *et al.*, 1967

## Carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>)

Esta sal es de baja solubilidad (0.0131 g L<sup>-1</sup>), pero aumenta considerablemente en presencia de ácido carbónico, gracias a la formación de bicarbonatos de calcio debido a la reacción:



Prácticamente no es nociva para la mayoría de plantas. La solubilidad del carbonato de calcio se encuentra influenciada en gran medida por el contenido de bióxido de carbono disuelto en el agua (Cuadros 2 y 3) <sup>75</sup>.

Cuadro 2. Solubilidad del carbonato de calcio de acuerdo con la cantidad del CO<sub>2</sub> en el aire, a una temperatura de 16°C.

Contenido de CO <sub>2</sub> en el aire en % (por volumen)	Contenido en g en 1.0 L de agua		pH
	De acuerdo con Schlening	De acuerdo con Weigner	
0.00	0.0131	0.0131	10.23
0.03	0.0634	0.0627	8.48
0.30	0.1334	0.1380	7.81
1.00	0.2029	0.2106	7.47
10.00	0.4700	0.4889	6.80
100.00	1.0986	1.0577	6.13

Fuente: Kovda *et al.*, 1967

Cuadro 3. Solubilidad del carbonato de calcio con una presión parcial de CO<sub>2</sub> de 0.00032 atm.

Temperatura °C	0	5	10	15	20	25	30
CaCO <sub>3</sub> (contenido)	0.081	0.075	0.070	0.065	0.060	0.056	0.052

Fuente: Kovda *et al.*, 1967

## Carbonato de sodio (Soda)

Las sales del ácido carbónico y sodio se encuentran ampliamente distribuidas en la naturaleza y se acumulan en suelos y aguas, a veces en cantidades considerables. El carbonato de sodio existe en suelos y aguas freáticas en distintas modificaciones. Es una sal del ácido carbónico y sodio, o sea Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

En los suelos se cristaliza con diferentes cantidades de agua ( $\text{NaCO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{NaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Cuando el carbonato de sodio  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  se hidroliza el pH de las soluciones alcanza valores de 10-12. Debido a su alta solubilidad ( $178 \text{ g L}^{-1}$ ) y alcalinidad, es muy tóxico para las plantas. La presencia de carbonato de sodio y de bicarbonato de sodio provoca que los sistemas coloidales de los suelos se dispersen o se pepticen, debido a altos valores del sodio intercambiable.

El bicarbonato de sodio se caracteriza por una menor alcalinidad y toxicidad en comparación con la soda normal ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Durante la evaporación de aguas freáticas que contienen carbonatos y bicarbonatos de sodio, se precipitan y se acumulan en horizontes superficiales de suelos cristales de una sal doble  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  o cristales puros de  $\text{NaHCO}_3$ <sup>75</sup>.

### **Carbonato de potasio**

Esta sal existe en los suelos y aguas en cantidades más pequeñas que el carbonato de sodio.

## **4.3.2 Sales del ácido sulfúrico**

### **Sulfatos**

Las sales del ácido sulfúrico se encuentran en grandes o pequeñas cantidades en casi todos los suelos y aguas. En suelos y aguas freáticas de estepas y desiertos, los sulfatos a veces se acumulan considerablemente. El valor agronómico o de mejoramiento de los sulfatos depende fuertemente del catión acompañante<sup>75</sup>.

### **Sulfato de calcio**

El sulfato de calcio o yeso es una sal que no es tóxica para las plantas, debido a que su solubilidad no es muy grande ( $1.9\text{-}2.3 \text{ g L}^{-1}$ ).

### **Sulfato de magnesio**

El sulfato de magnesio o Epsomita ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) es un componente típico de suelos salinos. Debido a su alta solubilidad ( $262 \text{ g L}^{-1}$ ) es de extrema toxicidad para las plantas. También se encuentra en aguas superficiales y en algunos lagos y sedimentos, nunca se acumula en suelos en forma pura, sino conjuntamente con otras sales solubles; en tales casos se requieren medidas radicales de mejoramiento, como lavados de suelo.

### **Sulfato de sodio**

Es una sal de suelos salinos, aguas freáticas salinas y lagos. La toxicidad del sulfato de sodio es dos o tres veces menor que la del sulfato de magnesio. Debido a cambios en la solubilidad del sulfato de sodio en función de la temperatura; la mirabilita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) fácilmente se deshidrata y transforma a tenardita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Por tanto, los suelos con abundancia  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  acumulan esta sal en la superficie, que se hace fofa. La capa superior, de 5 a 10 cm tiene una estructura muy suelta, fofa, con granos simples, estando las partículas del suelo floculadas en granos del tamaño de arena. La superficie tiene con frecuencia una delgada costra que es fácilmente rota y que evita que el suelo sea arrastrado por el viento<sup>109</sup>.

### **Sulfato de potasio**

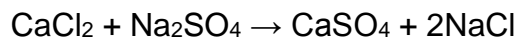
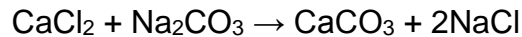
No se acumula en grandes cantidades en los suelos.

#### **4.3.3 Sales del ácido clorhídrico**

Los cloruros, conjuntamente con sulfatos, son los compuestos más importantes que provocan la formación de suelos salinos y aguas freáticas salinas. Todos los cloruros se caracterizan por una alta solubilidad y por ende, tienen alta toxicidad para las plantas.

## **Cloruro de calcio**

Esta sal existe en los suelos muy raras veces, debido a que reacciona fácilmente con el carbonato y sulfato de sodio fácilmente, para formar sulfato de calcio y carbonato de calcio; estas sales se precipitan en la solución del suelo de acuerdo con las reacciones siguientes:



Por eso la presencia del cloruro de calcio es característica de las soluciones de los suelos, de suelos y de aguas de lagos salados, pero solamente en grados extremos de salinización (de 400-500 g L<sup>-1</sup>). Esta sal también aparece en horizontes superficiales de suelos como una sal efímera, debido a reacciones de intercambio catiónico que ocurre en las soluciones ascendentes, entre el cloruro de sodio y el calcio intercambiable de los coloides del suelo.

## **Cloruro de magnesio**

Esta sal se encuentra con mayor frecuencia en suelos salinos, aguas freáticas salinas y lagos freáticos salinos, en comparación con el cloruro de calcio. Sin embargo, su acumulación de grandes cantidades ocurre solamente en grados máximos de salinización debido a su alta solubilidad (353 g L<sup>-1</sup>); se caracteriza por su alta toxicidad y es una de las sales más nocivas para las plantas.

## **Cloruro de sodio**

Conjuntamente con el sulfato de sodio y el sulfato de magnesio es una de las sales de mayor frecuencia y componente constante en suelos salinos, su alta solubilidad (264 g L<sup>-1</sup>) condiciona alta toxicidad para las plantas; inclusive en contenidos de 0.1% las plantas se desarrollan anormalmente. Muchos suelos salinos contienen 2-5% de NaCl.

## **Cloruro de potasio**

De acuerdo con sus propiedades químicas, en general, es análogo al cloruro de sodio. Sin embargo, con frecuencia en suelos no se encuentra ampliamente distribuido. Este aspecto se explica, por el consumo del potasio por las plantas y en gran medida, por la absorción del ion potasio por los sistemas arcillosos de los suelos. En grandes cantidades en suelos, su toxicidad es muy alta como la del cloruro de sodio NaCl.

### **4.4 Composición química de las aguas de suelos (extractos de saturación), aguas superficiales (ríos) y aguas de pozos**

La composición química de las aguas que circulan en la superficie y de las aguas subterráneas varía grandemente en regiones áridas y semiáridas. En el Cuadro 4 se muestran datos que se han seleccionado de extractos de saturación de suelos salinos, agua de pozos y de ríos que se han analizado en el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos<sup>66</sup>. Estas muestras se han tomado en muchas partes del mundo.

Las soluciones de extractos de saturación de suelos son más salinas y sódicas que las soluciones acuosas de aguas de pozos y ríos. Este aspecto, refleja los efectos de la evapotranspiración y el intemperismo, de minerales de rocas superficiales de la corteza terrestre, ya que con el aumento de contenidos salinos en las soluciones; el ion sodio ( $\text{Na}^+$ ) predomina sobre el ion calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), debido a que las sales de sodio son mas solubles que las sales de calcio. La importancia de esta consideración de que el ion  $\text{Na}^+$  predomina sobre el ion  $\text{Ca}^{2+}$  se refleja también en el aumento de valores de la relación de adsorción de sodio. Estos datos también muestran que el ión cloro ( $\text{Cl}^-$ ) es el anión predominante en aguas de mayor salinidad, mientras que el ión sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) prevalece en las soluciones acuosas diluidas. Este aspecto es muy notable, debido a los procesos de precipitación del yeso ( $\text{CaSO}_4$ ).



El aumento en la relación Mg/Ca expresa el hecho de que las sales del ion magnesio ( $Mg^{2+}$ ) son más estables que las sales del ion  $Ca^{2+}$ . En términos generales, la relación  $Ca/HCO_3$  es más grande que uno. Y como el ion  $Ca^{2+}$  se precipita en los suelos en forma de  $CaCO_3$ , la relación Mg/Ca también tiende a incrementarse.

Cuadro 4. Características químicas de los extractos de saturación de suelos salinos y sodicos, aguas de pozos y aguas de ríos que han sido analizados por el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos.

mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	Número de muestras	Origen	Media	Mediana	10% menor que	90% menor que
$Ca^{2+}$	139	Extracto de saturación	27.80	10.60	1.40	71.80
	115	Pozos	5.90	3.10	0.80	14.50
	68	Ríos	4.70	3.40	1.00	10.90
$Mg^{2+}$	139	Extracto de saturación	22.20	8.00	1.10	79.10
	115	Pozos	4.30	1.50	0.50	15.30
	61	Ríos	3.60	2.20	0.60	9.20
$Na^+$	139	Extracto de saturación	93.20	53.50	1.80	219.00
	115	Pozos	15.80	6.60	0.80	44.80
	58	Ríos	7.50	3.70	0.70	18.90
$K^+$	128	Extracto de saturación	1.60	0.50	0.10	2.20
	101	Pozos	0.60	0.10	0.01	0.90
	30	Ríos	0.30	0.20	0.06	0.50
$SO_4^{2-}$	134	Extracto de saturación	400.00	29.40	3.70	94.10
	23	Pozos	6.70	3.60	0.40	5.40
	58	Ríos	6.70	4.10	0.30	9.00
$Cl^-$	139	Extracto de saturación	95.50	34.80	1.40	281.00
	115	Pozos	15.00	2.50	0.20	54.20
	58	Ríos	5.90	1.50	0.20	20.70
$HCO_3^-$	139	Extracto de saturación	8.30	3.00	1.20	10.30
	115	Pozos	4.90	4.10	1.90	8.20
	58	Ríos	3.30	3.00	1.70	5.70
CE (dS m <sup>-1</sup> )	134	Extracto de saturación	12.90	8.80	1.10	33.70
	115	Pozos	2.40	1.20	0.30	7.30
	58	Ríos	1.40	0.92	0.30	3.20
RAS [mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ]	139	Extracto de saturación	38.50	15.10	0.90	56.10
	115	Pozos	6.60	4.70	0.60	16.50
	58	Ríos	3.30	2.40	0.70	7.40

Fuente: Jurinak y Suarez, 1990

#### **4.5 Aguas superficiales de diferentes partes del mundo**

En las grandes áreas bajo riego, la cantidad de agua de riego que se aplica a diferentes cultivos, casi siempre es en exceso en comparación con aquella cantidad que es necesaria para el USO CONSUNTIVO de diferentes cultivos.

El exceso de agua drena hacia fuera de la zona de riego a través de escurrimientos superficiales o se infiltra y percola hacia los horizontes subsuperficiales de suelos. Por lo general, estas percolaciones de agua de riego en exceso elevan los niveles freáticos de una determinada zona bajo riego, y además por otra parte, una cantidad considerable de aguas de riego que se han aplicado en exceso drenan nuevamente hacia los cauces de ríos aguas abajo.

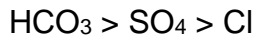
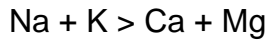
Esto que se menciona aquí se expresa considerablemente en el cauce del río Tula, el cual recibe todas las aguas que drenan por el área del Valle del Mezquital ya que la diferencia de altitud entre el inicio del riego en el Valle del Mezquital y el embalse de Zimapán es de aproximadamente 500 m. Las aguas urbano-industriales que derivan de la ciudad de México riegan el Valle del Mezquital por gravedad.

Por otro lado se debe mencionar que el ciclo de desviación del agua de un río para su almacenamiento, la aplicación de agua en una zona agrícola, la percolación del agua hacia las zonas profundas de suelos; el flujo de retorno hacia ríos aguas abajo se expresa en una cantidad grande de volúmenes de agua que pasa a través de una zona agrícola, ocasionando una pérdida de calidad del agua de riego. En las diferentes zonas de riego en cauces de escurrimiento de agua, en regiones agrícolas aguas abajo, la calidad del agua se tornará diferente.

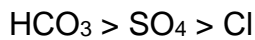
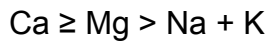
Las aguas superficiales pueden ser clasificadas en dos grupos: a. aguas que fluyen (ríos), y b. aguas estancadas (lagos). Los lagos que se encuentran en cuencas endorreicas poseen un alto contenido de sales y aguas de lagos abiertos de las zonas húmedas, que poseen una baja salinidad<sup>75</sup>.

Las aguas naturales, de acuerdo con las rocas que están en contacto poseen las siguientes características químicas (en unidades equivalentes).

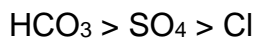
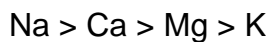
1. Aguas en contacto con rocas graníticas:



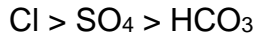
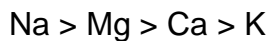
2. Aguas en contacto con rocas carbonatadas (calizas y dolomitas):



3. Aguas de acuíferos basálticos:



4. Aguas de mar:



En estudios de muchos años Kovda, 1967<sup>75</sup>, estableció que existen ciertas relaciones específicas entre la cantidad de sales en aguas naturales y sus composiciones. Durante el proceso de aumento de concentración de diferentes aguas, ocurren en estas diferentes etapas de cambio cuantitativo y cualitativo.

- a. Aguas naturales con ciertos contenidos de silicio. Estas son de baja concentración 0.01-0.1 mg L<sup>-1</sup>. Se localizan en los trópicos y en regiones forestales boreales. Contienen silicio y sustancias orgánicas.
- b. Aguas bicarbonatadas calcicas con concentraciones de sales de 0.2-0.3 g L<sup>-1</sup>.
- c. Aguas bicarbonatadas sodicas con concentraciones de 0.5-0.7 g L<sup>-1</sup>.

- d. Aguas bicarbonatadas y con carbonatos sodicos con concentraciones totales de sales de 0.5-3000 g L<sup>-1</sup>. Contienen sulfatos y a veces en menor cantidad cloruros.
- e. Aguas clorhídrico sulfáticas con algunas cantidades de soda Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, y con concentraciones totales de sales de 2.5-5 g L<sup>-1</sup>.
- f. Aguas sulfático-clorhídricas con concentraciones de sales de 20-50 g L<sup>-1</sup>. Por lo general no contienen carbonato de sodio en cantidades substanciales.
- g. Aguas clorhídricas. Son salmueras con concentraciones de sales de 100-300 g L<sup>-1</sup>.

Este esquema general arriba señalado para la existencia de aguas bicarbonatadas sódicas de yacimientos subterráneos y aguas superficiales con bajas concentraciones de sales (0.3-5 g L<sup>-1</sup>) fue establecido con base en una gran cantidad de datos hidrogeoquímicos y geoquímicos.

La concentración y composiciones de las aguas naturales superficiales que se utilizan para riego varían considerablemente en diferentes regiones del mundo. En los Cuadros 5 y 6, se presentan las composiciones de diferentes aguas que se utilizan en el riego<sup>57</sup>.

Un ejemplo de aguas de buena calidad para riego de una región fría y árida de la zona de los Himalayas son las que se presentan en el Cuadro 7<sup>99</sup>. Las cadenas montañosas de los altos Himalayas que bordean el Tibet comprenden la región de Kinnaur, Lahaul y Spiti y en las áreas contiguas de Himachal Pradesh, India representan las típicas regiones de gran altitud que son extremadamente frías y áridas. De acuerdo a la conductividad eléctrica y relación de adsorción de sodio, todas las aguas son buena calidad, sin embargo, los valores del RAS, indican que solamente las aguas del manantial de Chango, India presentaría bajos peligros de sodicidad. Los contenidos de carbonatos en todas las aguas son de bajos valores.

Cuadro 5. Calidad de las aguas superficiales (ríos), que son utilizadas para riego.

No.	Fuente de agua y localización	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Total	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> +HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Total	B	RAS	
		μS cm <sup>-1</sup>	mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>						mg L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>			
Aguas de ríos														
01	San Joaquín, Biola, C.A.	60.0	0.20	0.10	0.20	0.10	0.60	0.40	0.10	0.10	0.60	53.0	0.06	0.10
02	Feather, Nicolaus, C.A.	90.0	0.40	0.30	0.10	0.10	0.90	0.70	0.10	0.10	0.90	70.0	0.01	0.10
03	Columbia, Canadian Border	150.0	1.10	0.40	0.10	0.00	1.60	1.30	0.00	0.30	1.60	87.0	-	0.20
04	Sacramento, Knights Landing, C. A.	150.0	0.70	0.50	0.40	0.00	1.60	1.20	0.20	0.20	1.60	11.0	0.05	0.60
05	Snake, King Hill, ID	500.0	2.30	1.60	1.30	0.10	5.30	3.50	0.70	1.10	5.30	312.0	0.04	2.00
06	Missouri, Williston, N. D.	650.0	2.90	1.60	2.30	0.10	6.90	2.80	0.30	3.80	6.90	426.0	0.11	2.80
07	Río Grande, Falcon Dam, TX	670.0	3.00	1.00	2.60	0.10	6.70	2.40	1.90	2.40	6.70	419.0	0.15	3.50
08	South Platte, Julesburg, CO	1200.0	6.60	2.80	4.50	0.30	14.20	3.80	1.00	9.40	14.20	910.0	0.23	5.00
09	Colorado, Yuma, AZ	1400.0	5.20	2.60	6.40	0.20	14.40	2.80	4.00	7.60	14.40	914.0	0.18	7.10
10	Salt, Stewart Mtn Dam, AZ	1400.0	1.20	4.30	8.90	0.20	12.90	2.80	9.10	1.00	12.90	755.0	0.14	12.00
11	Arkansas, John Martain Dam, CO	1400.0	7.10	6.20	5.10	0.10	16.60	2.90	0.90	12.80	16.60	1130.0	0.15	4.90
12	Pecos, Artesia, NM	3400.0	20.40	12.00	13.30	0.00	39.90	2.30	13.80	23.80	39.90	2530.0	-	9.10
13	Gila, Gillespie Dam, AZ	7400.0	17.00		53.10	1.20	83.30	5.50	49.70	28.10	83.30	5120.0	0.28	40.00
Aguas de pozos														
01	Indio, CA	300.0	1.40	0.30	1.30	0.00	3.00	2.20	0.20	0.60	3.00	205.0	0.02	2.00
02	Bakersfield, CA	790.0	0.20	0.00	7.30	0.00	7.50	2.50	2.50	2.50	7.50	500.0	6.93	12.00
03	Scottsdale, AZ	1200.0	3.20	2.70	6.80	-	12.70	3.20	6.20	3.10	12.50	718.0	-	8.30
04	Tolleson, AZ	4000.0	6.40	4.10	33.30	-	43.80	10.80	24.90	8.10	43.80	2878.0	-	38.00
05	Pecos, TX	4400.0	9.30	16.10	21.80	0.70	47.90	1.90	29.10	16.90	47.90	2793.0	-	14.00
06	Roll, AZ	7200.0	14.80	11.70	48.00	0.30	74.80	6.30	55.40	13.10	74.80	4535.0	1.28	36.90

Fuente: Hoffman *et al.*, 1990.

Cuadro 6. Composición química de algunas aguas fluviales usadas para riego en el Oeste de los Estados Unidos.

No.	Ríos	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	mmol $\text{L}^{-1}$										RSE $\text{mg L}^{-1}$	RAS*	PSS**
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	TOTAL	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	TOTAL			
01	Columbia Winat chic Washington	150	0.90	0.40	0.20	0.00	1.50	0.00	1.20	0.10	0.20	1.50	78	0.24	13.00
			18.03	4.86	4.60	0.00		0.00	73.20	.	9.60				
			0.45	0.20	0.20	0.00		0.00	1.20	0.10	0.10				
02	Río Grande Otowí Ba N. Mex.	340	1.90	0.70	0.80	0.00	3.40	0.00	1.80	1.50	0.10	3.40	227	0.70	24.00
			38.07	8.50	18.40	0.00		0.00	109.80	53.17	4.80				
			0.95	0.35	0.80	0.00		0.00	1.80	1.50	0.05				
03	El Paso, Tex.	1160	4.20	1.40	6.00	0.00	11.60	0.00	3.60	3.10	5.00	11.70	754	3.58	52.00
			84.16	17.01	138.00	0.00		0.00	219.60	109.89	240.15				
			2.10	0.70	6.00	0.00		0.00	3.60	3.10	2.50				
04	Gila. Florence, Ariz.	1720	3.60	2.00	11.30	0.00	16.90	0.00	3.70	10.00	3.30	17.00	983	6.75	67.00
			72.14	24.30	259.90	0.00		0.00	225.70	354.50	158.49				
			1.80	1.00	11.30	0.00		0.00	3.70	10.00	1.65				
05	Pecos, Carlsbad N. Méx.	3210	17.30	9.20	11.50	0.00	38.00	0.00	3.20	12.00	23.00	38.20	2380	3.15	30.00
			346.69	111.78	264.50	0.00		0.00	195.20	425.40	1104.69				
			8.65	4.60	11.50	0.00		0.00	3.20	12.00	11.50				
06	Humboldt Rye Patch. N. Mex.	1170	1.70	1.90	7.90	0.00	11.50	0.00	5.20	4.50	2.20	11.90	658	5.88	68.00
			34.06	23.08	181.70	0.00		0.00	317.20	159.52	105.66				
			0.85	0.95	7.90	0.00		0.00	5.20	4.50	1.10				

Fuente: Hoffman *et al.*, 1990.

\*\*RAS= Relación de adsorción de sodio. Las concentraciones están expresadas en mmol $\text{L}^{-1}$ .

\*\*PSS= Porcentaje de sodio soluble (como porcentaje del total de cationes solubles).

Cuadro 7. Análisis químico de las aguas de riego de varias

fuentes en Kinnaur región de Himachal Pradesh, India.

No.	Localización Ríos	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	B	RAS*
				mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>				mg L <sup>-1</sup>	
01	Tapri (Sutlej river)	7.9	300	2.6	0.4	1.8	2.2	0.20	0.35
02	Kalpa (Boktu canal)	6.8	100	0.3	0.7	0.1	1.8	0.15	1.58
03	Akpa (irrigation tank)	6.9	250	1.3	1.2	1.0	1.6	0.10	1.50
04	Labrang (spring water)	7.8	550	5.3	0.2	3.1	2.0	0.08	0.12
05	Labrang (stream)	7.4	550	5.0	0.5	3.1	2.4	0.05	0.31
06	Siaso Khad (rivulet water)	6.4	250	2.1	0.4	0.8	1.6	0.80	0.39
07	Sunam (irrigation channel)	7.9	550	5.0	0.5	2.8	1.6	0.15	0.32
08	Pooh (irrigation channel)	7.6	300	2.7	0.3	1.1	1.2	0.25	0.26
09	Dubling (irrigation channel)	7.4	700	6.4	0.6	2.2	1.6	0.15	0.34
10	Chango (spring and stream)	6.9	100	0.2	0.8	0.2	1.4	0.05	2.60

Fuente: Negi y Ghosh, 1980

\* RAS= Relación de Adsorción de sodio. Las concentraciones están expresadas en mmol<sub>e</sub> L<sup>-1</sup>

#### **4.6 Calidad del agua de riego**

La calidad del agua se define por sus características físicas, químicas y biológicas<sup>31</sup> siendo los factores físicos y químicos de mayor importancia en aguas utilizadas para el riego. La calidad también cambia según el tipo, cantidad de sales disueltas, su movilidad y su acumulación en el perfil del suelo en la medida que se evapora el agua o es consumida por las plantas. Por lo tanto, la calidad del agua es una consideración importante para la investigación de las condiciones de salinidad o contenido de sodio intercambiable en los suelos de cualquier zona de riego<sup>126</sup>.

A medida que aumenta la agricultura bajo riego y se modifican las prácticas de manejo de cultivos, las aguas de riego de calidad variable han ido causando problemas muy serios en los suelos debido prácticamente a su mala calidad. En la actualidad existe la tendencia de usar para riego de cultivos agrícolas cualquier agua disponible.

En varias partes del mundo, así como en las zonas semiáridas y áridas de Pakistán, India, Australia, Oeste de Estados Unidos, Noroeste de China, países del norte de África y del Níger, en donde se han explotado hasta el límite aguas superficiales y parcialmente aguas subterráneas; la calidad físico-química de estas aguas no es satisfactoria. En México, podemos citar algunas áreas de Sonora, Baja California Sur, Sinaloa y Coahuila. De la misma manera, donde se usan aguas superficiales, el aumento de las áreas agrícolas bajo riego y los cambios que se han suscitado en las prácticas de manejo de cultivos y suelos, están causando problemas muy serios en lo que concierne a la calidad de las aguas. Esto significa que después de varios años de derivaciones de las corrientes superficiales (ríos y arroyos) pueden cambiar de una agua de río no contaminada a una proporción considerable de flujo revolvente de pobre calidad que proviene de las descargas de drenaje. Tal es el caso de los causes fluviales del Valle del Mezquital; como el río Tula y numerosos cauces de arroyos que conducen aguas residuales derivadas del Valle de México. Por lo general, estas aguas reutilizadas en el riego agrícola son de mala calidad.



Para tener la posibilidad de resolver los problemas que surgen debido al uso de aguas de mala calidad en zonas agrícolas se requiere que se tenga información detallada con respecto a la calidad del agua de riego. En los laboratorios de muchos países se han analizado una gran cantidad de muestras de agua<sup>10,24,25,34,35,55,65,68,69,71,80,81,82,84,86,104,128,147,148,149</sup>, como por ejemplo, en laboratorios de Rubidoux se han analizado más de 22 000 muestras de agua superficial y subterránea<sup>126</sup>. En el laboratorio de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados, en el área de manejo de aguas y suelos salinos, se han analizado mas de 20 000 muestras de aguas y extractos acuosos de suelos.

La información química y analítica de muestras de agua señala en alguna medida que las aguas superficiales y subterráneas son de baja calidad. La baja calidad de las aguas de riego desarrolla en suelos de zonas bajo riego diversos problemas de acumulación de sales y de fertilidad.

#### **4.7 Criterios que deben evaluarse en las aguas de riego**

La calidad del agua toma en cuenta tres criterios; salinidad, sodicidad y toxicidad. El criterio de salinidad evalúa el riesgo de que el uso del agua ocasione altas concentraciones de sales, con el correspondiente efecto osmótico y disminución de rendimiento de cultivos. El criterio de sodicidad analiza el riesgo de que se induzca un elevado porcentaje de sodio intercambiable (PSI), con deterioro de la estructura del suelo. El criterio de toxicidad estudia los problemas que pueden crear determinados iones<sup>109</sup>.

El establecimiento de ciertos parámetros de calidad del agua de riego, para la utilización de estas aguas en las actividades agrícolas, siempre ha sido una preocupación de los productores agrícolas. Las autoridades estatales han propuesto distintos estándares de calidad para diferentes usos del agua; ya sean urbanos, domésticos, industriales o agrícolas, se requieren distintas exigencias de calidad del agua.

Las perspectivas de uso de una agua en la agricultura deben encaminarse, hacia la evaluación de ciertos parámetros que pueden desarrollar problemas potenciales en suelos bajo riego, y en el desarrollo y crecimiento de diferentes cultivos que se explotan en la agricultura.

#### **4.7.1 Criterios de salinidad**

Un elevado contenido de sales en el agua de riego puede conducir a la salinización de un suelo en un periodo de tiempo muy corto. Los criterios que analizan el riesgo de salinidad se basan en índices que expresan la concentración de sales del agua de riego<sup>109</sup>.

La salinidad es la concentración de sales minerales presentes y disueltas en las aguas de riego y en las soluciones de suelos sobre una base de volumen o peso. Los solutos más comunes que comprenden las sales minerales disueltas son los cationes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y los aniones  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y se considera algunas veces el ion nitrato  $\text{NO}_3^-$ . También se señalan otros constituyentes que contribuyen a la salinidad en las aguas y en las soluciones de suelos hipersalinos y estas incluyen a:  $\text{B}^{3+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{SO}_3^{2-}$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$  y  $\text{Al}^{3+}$ .

##### **4.7.1.1 Conductividad eléctrica (CE)**

La capacidad de conducir la corriente de una solución es proporcional a la concentración de iones en dicha solución.

Para medir la concentración de sales o sea de solutos en una solución acuosa determinada, se utiliza la conductividad eléctrica (que es el recíproco de la resistencia) y es entonces que esta medida se ha usado por muchos años como un método estándar para hacer la medición de concentraciones de sales en soluciones acuosas<sup>120,123</sup>.

Este proceso está basado en el hecho de que los electrolitos se disocian en iones cargados ( $\Sigma n^+$ ,  $\Sigma n^-$ ) en presencia de agua. Los diferentes iones conducen la corriente eléctrica; y entre mayor es la concentración de iones, es más grande la capacidad de conducir la corriente eléctrica, es decir, la conductividad eléctrica de la solución es más grande.

La conductividad está expresada como el recíproco de ohms, y que es  $\text{ohms}^{-1}$ , y como se deriva de esto, se refiere como mho.

La conductancia específica o conductancia de cualquier solución cuya resistencia R se mide en una celda con una constante K está expresada como sigue:

$$\text{Conductancia específica} = K \frac{1}{R} = \text{mhos cm}^{-1}$$

Donde:  $\text{cm}^{-1}$ , se refiere a la distancia entre los electrodos.

Las medidas de la conductividad se hacen en una celda que contiene dos electrodos de una geometría definida. Se aplica un potencial eléctrico a través de los electrodos y la resistencia de la solución entre los electrodos es medida. Los resultados son multiplicados por una constante de celda para corregir las variaciones en la geometría de la celda. Esto permite reportar todos los datos como conductancia específica CE o sea, la conductividad por unidad de volumen ( $1 \text{ cm}^3$ ) de solución en siemens por centímetro ( $\text{S cm}^{-1}$ )<sup>109</sup>

En el sistema internacional de unidades (SI), mhos esta denominado como siemen (S)<sup>66</sup>. El siemens es también demasiado grande para medir la conductancia eléctrica en la mayoría de los sistemas acuosos naturales. De ahí que entonces, se trabaje con unidades de milisiemens por cm ( $\text{S} \times 10^{-3}$ ), esto es  $\text{mS cm}^{-1}$ . Y debido a que la unidad básica de longitud es el sistema internacional (SI) en el metro, la dimensión que se prefiere para la conductividad eléctrica CE es el decisiemens por metro ( $\text{dS m}^{-1}$ ), de tal manera entonces se tiene:  $\text{dS m}^{-1} = \text{mS cm}^{-1} = \text{mmhos cm}^{-1}$

Donde:  $\text{mmhos cm}^{-1}$  (milimhos por centímetro), ha sido el parámetro tradicional de medida que se ha utilizado para expresar la conductividad eléctrica de soluciones salinas en suelos y aguas de riego, se reportan en las siguientes unidades de medición: decisiemens por metro ( $\text{dS m}^{-1}$ ) que es equivalente a milimhos por centímetro ( $\text{mmhos cm}^{-1}$ ) y la conductividad eléctrica de mediciones mas pequeñas, se reporta con  $\text{dS m}^{-1} \times 10^{-3}$  o microsiemens por centímetro ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) que es equivalente a micromhos por centímetro ( $\mu\text{mhos cm}^{-1}$ ), ahora esta forma de medición esta quedando en desuso<sup>109</sup>.

La conductividad eléctrica es uno de los índices más frecuentes que analiza el riesgo de salinidad, basándose en la concentración de sales del agua de riego<sup>120,123</sup>. Casi todas las aguas para riego que se han usado por mucho tiempo tienen una conductividad eléctrica menor a  $2250 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Ocasionalmente se usan aguas de mayor conductividad, pero las cosechas obtenidas no han sido satisfactorias, excepto en raras ocasiones<sup>126</sup>. Para fines de diagnóstico y de clasificación de las aguas de riego de acuerdo con su conductividad eléctrica, se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- a. Aguas con  $\text{CE} < 750 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Son satisfactorias para el riesgo por lo que respecta a la concentración de sales.
- b. Aguas con CE entre 250 y  $750 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Los cultivos sensibles pueden ser afectados de manera adversa.
- c. Aguas con CE entre 750 y  $2250 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Se obtiene un crecimiento adecuado de las plantas, siempre y cuando se haga un buen manejo de los suelos y se cuente con drenaje eficiente, sin embargo, si el lavado y drenaje no son adecuados se presentarán condiciones de salinidad.
- d. Aguas con  $\text{CE} > 2250 \mu\text{S cm}^{-1}$ . El empleo de estas aguas es una excepción y en pocas ocasiones se tienen buenas cosechas. Únicamente los cultivos mas tolerantes a las sales se pueden desarrollar bien.

Cuando las aguas para riego se clasifican, es de suponerse que estas aguas se van a utilizar en condiciones medias con respecto a la textura o composición mecánica de los suelos, a la velocidad de infiltración, al drenaje de los suelos, a la cantidad usada de agua o uso consuntivo de los cultivos, el clima y a la tolerancia de los cultivos a las sales solubles.

También es necesario señalar que, cuando se tienen desviaciones considerables del valor promedio de cualquiera de estas variables, puede hacerse insegura la utilización de una agua, que bajo condiciones medias esta agua sería de buena calidad o por el contrario, estas desviaciones pueden influir que se condicione una agua como buena, cuando bajo condiciones medias esta agua sería de dudosa calidad.

En el diagrama de Richards, 1973<sup>126</sup> las aguas se dividen en cuatro clases con respecto a su conductividad eléctrica, siendo los puntos de división entre las clases mencionadas, los valores de 250; 250-750; 750-2250 y 2250-5000  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . De esta manera, las aguas con base en la conductividad eléctrica se dividen en cuatro clases:

**Aguas de baja salinidad (C1).** Estas aguas pueden utilizarse en el riego agrícola en la mayor parte de los cultivos, y en cualquier tipo de suelo con muy poca probabilidad de que en estos suelos se desarrolle la acumulación de sales. Se requiere de alguna fracción de lavado, sin embargo, éste se logra en condiciones normales de riego, con excepción de suelos con muy baja permeabilidad

**Aguas de salinidad media (C2).** Pueden utilizarse siempre y cuando se tenga un grado moderado de lavado. En casi todos los casos y sin necesidad de prácticas especiales de control de la salinidad, se pueden establecer cultivos moderadamente tolerables a las sales.

**Aguas altamente salinas (C3).** No pueden utilizarse en suelos cuyo drenaje sea deficiente. Y aún con drenaje adecuado se pueden requerir prácticas especiales de control de la salinidad, debiéndose por lo tanto, seleccionar cultivos muy tolerantes a las sales.

**Aguas muy altamente salinas (C4).** No son apropiadas para riego bajo condiciones comunes, pero pueden utilizarse ocasionalmente en condiciones muy especiales. Los suelos deber ser permeables, el drenaje adecuado, debiéndose aplicar un exceso de agua para que se tenga un buen lavado. En este caso se deben escoger cultivos altamente tolerantes a las sales.

La salinidad reduce el crecimiento y desarrollo de las plantas; porque la concentración de sales en la solución del suelo, disminuye la disponibilidad de agua para que sea absorbida por las raíces de plantas. Los iones solubles reducen la disponibilidad de agua hacia la planta, debido a un fenómeno que se conoce como el efecto de la presión osmótica<sup>95</sup>

#### **4.7.1.2 Presión osmótica (PO)**

El efecto general que tienen las sales solubles de las soluciones acuosas de suelos es la presión osmótica. El efecto osmótico de las soluciones acuosas esta relacionado con la concentración total de sales, y no tanto con concentraciones específicas de uno u otro componente. Estos efectos son evidenciados de manera general con retardos en el crecimiento de cultivos; presentándose plantas con pocas y pequeñas hojas<sup>95</sup>.

Muchos procesos químicos y biológicos dependen del paso selectivo de las moléculas del disolvente a través de una membrana porosa, desde una disolución diluida a una de mayor concentración. Una membrana semipermeable permite el paso de moléculas del disolvente pero impide el paso de moléculas del soluto.

El movimiento neto de las moléculas del disolvente a través de las membranas semipermeables; desde el disolvente puro, o desde la disolución diluida hasta la disolución más concentrada, recibe el nombre de ósmosis<sup>78</sup>. La presión osmótica ( $\pi$ ) de una disolución es la presión que se requiere para detener la ósmosis se expresa en atmósferas y ésta dada por:

$$\pi = MRT$$

Donde: T, es la temperatura absoluta ( $^{\circ}\text{K}$ ); M, es la molaridad de la disolución ( $\text{M L}^{-1}$ ); R, es la constante de los gases ( $0.082037 \text{ L atm/ K mol}$ ). La presión osmótica

Debido a que las mediciones de la presión osmótica se llevan a cabo a temperaturas constantes, la concentración se expresa en unidades de molaridad, más conveniente que las de molalidad. Al igual que la elevación del punto de ebullición y la disminución del punto de congelación, la relación es directamente proporcional a la concentración de la disolución. Esto es lo que deberá esperarse, ya que todas las propiedades coligativas dependen solo del número de partículas de soluto disueltas en la disolución<sup>85</sup>.

La disponibilidad del agua en el suelo está relacionada con la suma del potencial mátrico y del potencial osmótico. Como el contenido de agua en el suelo disminuye, el potencial mátrico y su potencial osmótico disminuyen, es decir, estos se hacen más negativos. La evaporación y la transpiración de las plantas disminuyen el contenido de humedad en el suelo, quedándose las sales solubles en la solución del suelo, de tal manera, que el potencial mátrico y el potencial osmótico disminuyen paulatinamente a medida que el contenido de agua en el suelo también disminuye<sup>85</sup>.

### **Efectos osmóticos en los cultivos**

El potencial osmótico es el componente del potencial del agua, que resulta de la presencia de partículas de soluto y es equivalente a la presión osmótica en concepto, pero de signo opuesto.

El potencial osmótico puede ser expresado en términos de energía, mientras que la presión osmótica siempre se expresa en términos de presión<sup>85</sup>.

Si el potencial osmótico de un medio se hace mas bajo que el de las células de las plantas, éstas plantas por consiguiente sufrirán una desecación osmótica o el fenómeno conocido como “sequía fisiológica”, y para sobrevivir las plantas deben ajustarse osmóticamente, por ejemplo, en un medio dado de alta salinidad, las plantas deben aumentar sus concentraciones internas de solutos. Estos aumentos pueden ser ajustados por una absorción de iones de la solución del medio, o por síntesis de compuestos orgánicos, o por ambos.

Las glicófitas, que generalmente están expuestas a salinidades moderadas, tienden a excluir y apartar la sal que estas plantas pueden absorber de las hojas y por consiguiente, también evitar una exposición directa del aparato fotosintético a la sal<sup>85,95</sup>.

Los osmólitos de las plantas superiores son: aminoácidos (prolina) monosacáridos y disacáridos (sacarosa, glucosa y fructosa), metilaminas (Glynfetaina y prolinebeticina) alcoholes polyhidricos (D-sorbitol y D-manitol) y otros.

### **Efectos por iones específicos**

Los iones específicos también contribuyen a una disminución del potencial osmótico. Altas concentraciones de un solo ion, pueden causar desordenes en la nutrición mineral. Por ejemplo, altas concentraciones de sodio pueden causar deficiencias de otros elementos, tales como potasio o calcio. Ciertos iones como los cloruros, pueden tener efectos tóxicos, y que por lo general, no siempre estos efectos se pueden distinguir claramente de las deficiencias de otros tipos de iones. Por último, algunos iones pueden tener efectos específicos, que promueven el desarrollo de aspectos cualitativos de las plantas<sup>85</sup>.



#### 4.7.1.3 Índice de salinidad efectiva (SE)

Este índice de clasificación estima el peligro que pueden producir las sales mas solubles del agua al formar parte de la solución del suelo, es decir que al sustraerse de la concentración total, los carbonatos de calcio y magnesio y los sulfatos de calcio; cuando estos se precipitan en el momento en que el agua de riego pasa a formar parte de la solución del suelo y dejan de participar en el ascenso de la presión osmótica de la solución del suelo<sup>37</sup>. Este proceso es más notable cuando las aguas tienen un contenido alto de carbonatos y bicarbonatos<sup>33</sup>.

La salinidad efectiva se calcula de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Si } \text{Ca}^{2+} > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$$

Entonces:

$$\text{SE} = \text{suma de cationes} - (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$$

$$\text{Si } \text{Ca}^{2+} < (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}); \text{ pero } \text{Ca}^{2+} > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$$

Entonces

$$\text{SE} = \text{suma de cationes} - \text{Ca}^{2+}$$

$$\text{Si } \text{Ca}^{2+} < (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-); \text{ pero } (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) > (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$$

Entonces

$$\text{SE} = \text{suma de cationes} - (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$$

$$\text{Si } (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) < (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$$

Entonces

$$\text{SE} = \text{suma de cationes} - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

Donde: Todos los iones están expresados en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>.

Los valores recomendados de acuerdo al índice de salinidad efectiva<sup>33</sup> se presentan en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con su salinidad efectiva.

<b>Clase</b>	<b>Salinidad Efectiva (mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>)</b>
Buena	< 3
Condicionada	3 a 15
No recomendable	> 15

Fuente: Coras, 2000

#### 4.7.1.4 Índice de salinidad potencial (SP)

Este índice determina la cantidad de Cl<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> que puede ser perjudicial a los cultivos debido al incremento de la presión osmótica de la solución del suelo. Los cloruros y sulfatos son sales que se quedan en la solución del suelo, cuando la humedad aprovechable por las plantas es <50%<sup>33</sup>. La fórmula para determinar la salinidad potencial es la siguiente:

$$SP = Cl^- + \frac{1}{2} SO_4^{2-}$$

Donde: Las concentraciones de estos iones se expresan en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>

En el Cuadro 9 se presenta la clasificación de las aguas de acuerdo al índice de salinidad potencial<sup>33</sup>:

Cuadro 9. Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con su salinidad potencial

<b>Clase</b>	<b>Salinidad Potencial (mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>)</b>
Buena	< 3
Condicionada	3 a 15
No recomendable	> 15

Fuente: Coras, 2000

#### 4.7.2 Criterios de sodicidad

Cuando se tienen altos valores de sodio intercambiable en los suelos, en estos se presentan disminuciones en la permeabilidad, alteraciones en el medio poroso y efectos tóxicos del  $\text{Na}^+$ , que se encuentra adsorbido en las plantas sensibles a este elemento<sup>109</sup>.

Los efectos en suelos del sodio intercambiable son evidentes debido al encharcamiento y a la disminución de la velocidad de infiltración del agua de riego. La toxicidad del ion sodio se manifiesta generalmente mediante coloraciones cafés en las hojas y por la caída simultanea de las hojas.

Con respecto al contenido de sodio en las aguas de riego; las aguas se clasifican utilizando la relación de adsorción de sodio o RAS (Figura 1). Esta clasificación de las aguas de riego, se basa principalmente en el efecto que tiene el ion sodio adsorbido, sobre las condiciones físicas de los suelos<sup>126</sup>:

**Aguas bajas en sodio (S1).** Pueden utilizarse para riego agrícola en la mayoría de los suelos, con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. Aunque no obstante, los cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidades perjudiciales de sodio.

**Aguas medias en sodio (S2).** En suelos de composición mecánica fina, el sodio representa un peligro considerable, y más aún, si dichos suelos poseen una alta capacidad de intercambio de cationes, y especialmente bajo condiciones de lavado deficiente, a menos que el suelo contenga yeso. Estas aguas solo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad.

**Aguas con altos contenidos en sodio (S3).** Estas aguas pueden producir niveles altos de sodio intercambiable en la mayoría de los suelos, por lo que éstos necesitarán prácticas especiales de manejo, es decir, buen drenaje, fácil lavado y suficientes adiciones de materia orgánica.

Los suelos yesíferos pueden no desarrollar niveles perjudiciales de sodio intercambiable, cuando se riegan con este tipo de aguas. Puede requerirse el uso de mejoradores químicos para sustituir al sodio intercambiable, sin embargo, tales mejoradores no serán económicos si se usan aguas de muy alta salinidad.

**Aguas con muy altos contenidos de sodio (S4).** Estas aguas son inadecuadas para riego, excepto cuando su salinidad es baja o media y cuando la disolución del calcio del suelo o la aplicación de yeso u otros mejoradores no hace antieconómico el empleo de esta clase de aguas.

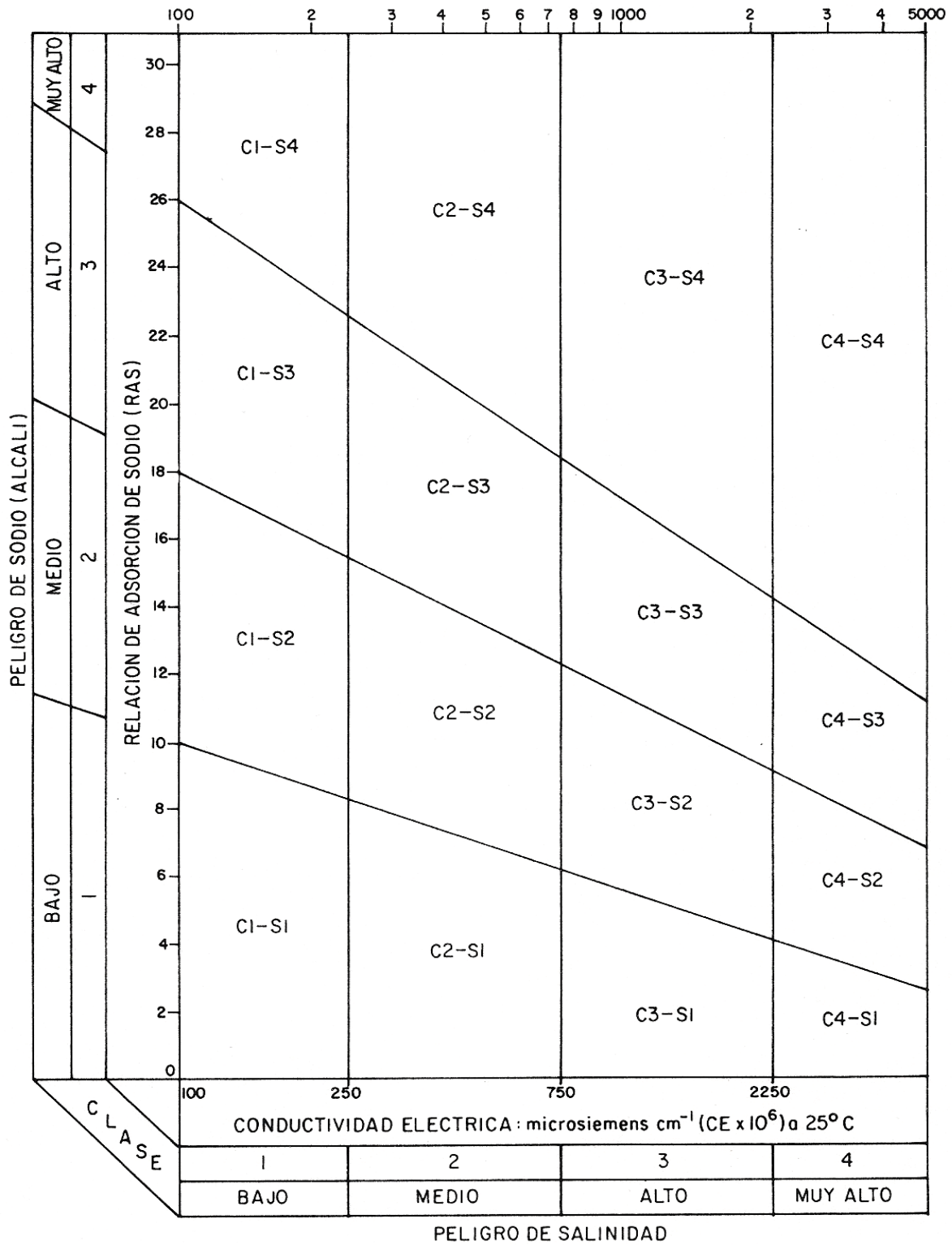


Figura 1. Diagrama para la clasificación de las aguas de riego.

#### **4.7.2.1 Relación funcional porcentaje de sodio intercambiable-relación de adsorción de sodio (PSI-RAS)**

La posibilidad de predecir la distribución de iones en la solución del suelo y los iones adsorbidos en los sistemas coloidales de los suelos, es de mucha importancia para el manejo de suelos con problemas de salinidad y de sodicidad<sup>70</sup>. La complejidad de la fracción arcillosa y la naturaleza multiiónica de la solución del suelo hacen, difícil una definición rigurosa de una distribución de iones en el complejo de intercambio catiónico. Un parámetro de evaluación de la posibilidad de uso de una determinada agua de riego es el nivel en que el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) se encontrará en el suelo debido a procesos de adsorción del sodio de las aguas de riego en el complejo de intercambio catiónico de suelos.

El porcentaje de sodio intercambiable es la propiedad con lo cual disminuye la permeabilidad de los suelos, además de las manifestaciones tóxicas del ion sodio en los cultivos<sup>148</sup>. Estos efectos del ion sodio están bien correlacionados<sup>18</sup>. Por consiguiente, cualquier posible evaluación del peligro potencial de la sodicidad de un agua de riego, deberá relacionarse con el porcentaje de sodio intercambiable, que tendrá que encontrarse en el suelo derivado del uso de una agua de riego.

Como ya se ha mencionado, el peligro de sodicidad de las aguas de riego puede afectar la producción de cultivos. El peligro potencial de la sodicidad de un agua es a veces evaluado con los valores de la relación de adsorción de sodio y con los valores de la salinidad. La sodicidad de un suelo está dada por el porcentaje de sodio intercambiable (PSI), esto significa el porcentaje de cargas negativas utilizadas con iones de sodio<sup>151,152</sup>.

El PSI de un suelo puede ser estimado de la relación de adsorción de sodio (RAS) del agua, cuando el agua está en equilibrio con el suelo y en condiciones de saturación<sup>44</sup>. La ecuación para calcular el PSI a partir de la relación de adsorción de sodio se obtiene de la siguiente manera:

$$\frac{X_{Na}}{CIC - X_{Na}} = \text{kg RAS} \text{ y } PSI = \frac{X_{Na}}{CIC} 100$$

Después de hacer los arreglos correspondientes la ecuación final es:

$$\frac{PSI}{100 - PSI} = \text{kg RAS}$$

Y despejando PSI nos queda como resultado:

$$PSI = \frac{\text{kg RAS}}{1 + \text{kg RAS}} 100$$

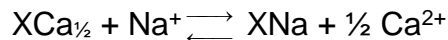
Esta es la ecuación para calcular el porcentaje de sodio intercambiable de un suelo conociendo la relación de adsorción de un agua de riego determinada en condiciones de equilibrio y saturación del suelo con esa agua.

#### 4.7.2.2 Ecuación de intercambio catiónico de Gapon

Una aproximación común del intercambio de iones es aplicar el principio de la ley de acción de masas.

La reacción de intercambio catiónico de Gapon, ha sido ampliamente utilizada en los estudios de salinidad y de sodicidad<sup>20,39,40,41,42,64,102,104,115,131,142,151,152</sup>.

La expresión original de intercambio de iones Na-Ca se expresa como sigue:



Donde: Las concentraciones de los iones en solución se expresan en mol L<sup>-1</sup>; Las concentraciones de los iones en el complejo de intercambio de cationes están expresadas en cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>.

En condiciones de equilibrio esta ecuación<sup>66</sup> se escribe como sigue:

$$kg = \frac{X_{Na} (C_{Ca^{2+}})^{1/2}}{X_{Ca_{1/2}} (C_{Na^+})}$$

Donde: kg, es el coeficiente de selectividad iónica de Gapon y que se asume como constante, para cada suelo en particular.

La relación de iones adsorbidos y en solución, por consiguiente, se expresa como:

$$\frac{X_{Na}}{C_{Ca_{1/2}} X} = kg \frac{(C_{Na^+})}{\sqrt{C_{Ca^{2+}}}}$$

El laboratorio de salinidad de los Estados Unidos, 1954<sup>67,131</sup> consideró que el ión magnesio  $Mg^{2+}$  se comporta similarmente al ión calcio  $Ca^{2+}$ , en la fase adsorbida del complejo de intercambio catiónico. Si se toma en cuenta la modificación introducida a la ecuación de Gapon, entonces, esta se expresa como sigue:

$$\frac{X_{Na}}{X_{Ca} + X_{Mg}} = kg' = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{(C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}})}} = kg' RAS$$

Donde: kg', es el coeficiente de selectividad iónica de Gapon modificado expresado en  $(mmol L^{-1})^{-1/2}$  y RAS, es la relación de adsorción de sodio que se encuentra definida como sigue:

$$RAS = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{(C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}})}}$$

Donde: Las concentraciones totales analíticas están expresadas en  $mmol L^{-1}$

Y por consiguiente, debido a que el  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y el  $Na^+$  son los cationes intercambiables más comunes en el suelo de las zonas áridas, la ecuación se puede simplificar como sigue:



$$\frac{X_{Na}}{CIC - X_{Na}} = kg' RAS = RSI$$

Donde: RSI, se conoce como la relación de sodio intercambiable.

En términos del porcentaje de sodio intercambiable PSI la ecuación se expresa como:

$$\frac{PSI}{100 PSI} = kg' RAS = RSI$$

Donde: PSI, es  $\frac{X_{Na}}{CIC} 100$

Y puesto que es difícil obtener datos confiables de los cationes intercambiables, de aquí que entonces, la relación de sodio intercambiable RAS de la solución del suelo o de los diferentes extractos de saturación y de las aguas de riego, ha sido utilizada como el parámetro fundamental para el diagnóstico de los peligros de sodicidad de los suelos, cuando estos se encuentran en condiciones de equilibrio con las aguas de riego.

El valor de la constante de selectividad iónica de Gapon (kg) se determina al graficar la relación funcional RSI-RAS; y considerando que esta dependencia es lineal, entonces, la pendiente se obtiene aplicando las técnicas de regresión lineal.

El valor del coeficiente de selectividad iónica de  $kg'=(0.015 \text{ mmol L}^{-1})^{-\frac{1}{2}}$  es constante en estudios de campo cuando la relación de sodio intercambiable  $RSI \leq 30$ . Y entonces, de manera correspondiente, como una buena aproximación de los niveles de sodicidad en los suelos (o sea los valores de sodio intercambiable), los valores de la relación de adsorción de sodio (RAS) y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) se pueden asumir como iguales o equivalentes<sup>131</sup>. Sin embargo, en recientes estudios que se han llevado a cabo, señalan que diferentes factores influyen en la relación funcional conjunta RSI-RAS.

En diversas investigaciones se han determinado diferentes valores del coeficiente de selectividad iónica de Gapon ( $kg$ )<sup>12,83,115,121,124</sup> obteniéndose un rango de valores de 0.016 a 0.008 ( $mmol L^{-1}$ )<sup>-1/2</sup>. El laboratorio de salinidad de los Estados Unidos, para los suelos de zonas áridas y semiáridas del Oeste de Estados Unidos recomienda un valor del coeficiente de selectividad iónica de Gapon de 0.015 ( $mmol L^{-1}$ )<sup>-1/2</sup>.

Estas observaciones nos indican que para determinar con exactitud el valor del coeficiente de selectividad iónica de Gapon ( $kg$ ), es necesario evaluar este coeficiente experimentalmente, con los suelos en los que se requiere estimar el coeficiente de Gapon<sup>36,67</sup>. Las variaciones del coeficiente de selectividad iónica de Gapon dependen de la mineralogía de los cristales arcillosos y de los grupos funcionales de las moléculas orgánicas<sup>23,41,44,45,54,55,83,97,117</sup>.

#### **4.7.2.3 Relación de adsorción de sodio original o explícita (RAS)**

El RAS de una determinada agua de riego ( $RAS_{AR}$ ), puede ser usada como medida del peligro de sodicidad de esta agua, dado que este  $RAS_{AR}$  está relacionado con el RAS que se tendrá como resultante en el agua del suelo ( $RAS_{AS}$ ) cuando se tuvieran condiciones ideales de equilibrio. Sin embargo, uno de los mayores factores que afectan los valores del RAS final del agua del suelo, es la pérdida o ganancia en contenidos del calcio y magnesio debido a la precipitación o disolución de carbonatos alcalino-térreos. Un factor adicional es la introducción del calcio y magnesio, además de los bicarbonatos, en la solución del suelo debido al intemperismo de ciertos minerales del suelo<sup>11,107</sup>.

Los efectos de estos procesos, han limitado la aplicabilidad de los valores del  $RAS_{AR}$  por sí mismos como índices apropiados de estimación de la sodicidad del agua para los casos de aguas de salinidad relativamente alta y bajas en carbonatos<sup>157</sup>. En el caso de aguas de riego que tienen concentraciones apreciables de carbonatos, se tiene una tendencia de que el  $CO_3^{2-}$  y el  $HCO_3^-$  precipitan en el suelo como  $CaCO_3$ . Debido a estos procesos el  $RAS_{AS}$  se incrementa.

De ahí que, la determinación de la relación de adsorción de sodio de una agua del suelo en equilibrio con el agua de riego, es de gran importancia, ya que de acuerdo con la ley de acción de masas, existe una proporcionalidad entre los valores del porcentaje de sodio intercambiable y los valores que pueden tenerse en aguas de riego del parámetro relación de adsorción de sodio (RAS).

Por lo tanto, este parámetro se ha utilizado<sup>11,67,74,93,97,105,107,134,139,143,144</sup> con muchas ventajas para hacer un excelente diagnóstico de problemas de sodicidad en suelos, en lugar de la determinación directa del porcentaje de sodio intercambiable.

Para poder inferir sobre los contenidos de sodio intercambiable en suelos, como resultado de un estado de equilibrio entre el RAS de las aguas residuales de suelos y el porcentaje de sodio intercambiable de los mismos, se calcula el valor de la relación de adsorción de sodio de aguas de riego en sus valores originales o explícitos, es decir, sin considerar variaciones en las concentraciones de calcio y de magnesio. Estos valores de RAS son explícitos y son considerados por la siguiente ecuación:

$$\text{RAS} = \frac{C_{\text{Na}^+}}{\sqrt{\frac{C_{\text{Ca}^{2+}} + C_{\text{Mg}^{2+}}}{2}}}$$

Donde: RAS, es la relación de adsorción de sodio explícita [ $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ]<sup>1/2</sup>;  $C_{\text{Na}}$ ,  $C_{\text{Ca}}$ ,  $C_{\text{Mg}}$ , son las concentraciones de iones expresados ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ).

#### 4.7.2.4 Relación de adsorción de sodio ajustado (RAS<sub>aj</sub>)

Otro valor de RAS, es aquel que considera variaciones en la composición de aguas de riego, en lo que concierne a la cuantificación de efectos de precipitación o disolución del carbonato de calcio<sup>21,22</sup>.

$$\text{RAS}_{\text{aj}} = \frac{C_{\text{Na}^+}}{\sqrt{\frac{C_{\text{Ca}^{2+}} + C_{\text{Mg}^{2+}}}{2}}} [1 + (8.4 - \text{pH}_c)]$$

Donde:  $RAS_{aj}$ , son los valores que se obtienen al modificar los valores del RAS original o explícito de las aguas de riego expresados en  $mmol_c L^{-1}$ ; RAS, son los valores que se obtienen de manera explícita de las determinaciones químicas del  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  de las aguas de riego expresadas en  $mmol_c L^{-1}$ ; 8.4, es el valor del pH de un suelo calcáreo no sódico en equilibrio con el  $CO_2$  con la atmósfera;  $pH_c$ , son los valores teóricos del agua de riego que tendrá cuando esta agua esté en equilibrio con el  $CaCO_3$ .

El término  $(8.4-pH_c)$  refleja la tendencia del agua de riego que se aplica a los suelos de precipitar o disolver la calcita  $CaCO_3$ . Cuando  $(8.4-pH_c) > 0$  para una agua de riego, el carbonato de calcio precipita en el suelo y cuando  $(8.4-pH_c) < 0$ , entonces, el agua de riego que se aplica a los suelos solubiliza el carbonato de calcio  $CaCO_3$  que se encuentra en el suelo<sup>22</sup>.

### **La precipitación de bicarbonatos en el agua de riego**

Aunque el contenido de bicarbonatos en las aguas de riego no se ha incorporado en ningún diagrama de clasificación de las aguas de riego, éstos deben tomarse en cuenta en cualquier esquema de clasificación de las aguas de riego.

Cuando las aguas residuales de riego poseen concentraciones apreciables de iones bicarbonato ( $HCO_3^-$ ); como son las aguas residuales que riegan las áreas agrícolas del Valle del Mezquital, es necesario considerar que, una determinada fracción de los contenidos de calcio se precipita de acuerdo con la ecuación siguiente:



La precipitación de la calcita causa una disminución en la salinidad del suelo, sin embargo, también a su vez, aumenta la proporción de sodio en la solución del suelo, por consiguiente, se aumenta el sodio intercambiable en el complejo de intercambio catiónico de los suelos.

Y aunque la magnitud de la precipitación de los bicarbonatos de las aguas de riego, depende de una variedad de condiciones tales como: prácticas de manejo del agua de riego, de las condiciones y tipos de suelos, así como de las composiciones iónicas de las aguas de riego, es entonces necesario, contar con un índice que nos muestre la tendencia de la precipitación del carbonato de calcio o calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) de las aguas de riego.

Langelier, 1936<sup>77</sup>; propuso un índice denominado “Índice de Saturación” que señala con que magnitud en las aguas que fluyen en un sistema cerrado (sin pérdida de  $\text{CO}_2$ ), se precipita o se disuelve la calcita  $\text{CaCO}_3$ .

El índice de saturación está definido como el pH actual de una agua ( $\text{pH}_a$ ) menos el pH teórico ( $\text{pH}_c$ ) que el agua deberá tener, si esta agua esta en equilibrio con la calcita  $\text{CaCO}_3$ <sup>22,77</sup>. Este índice de saturación se define como sigue:

$$\text{Índice de saturación (SI)} = \text{pH}_a - \text{pH}_c$$

Los valores positivos (+) de este índice indicarán que la calcita  $\text{CaCO}_3$  se precipitará del agua de riego. Los valores negativos (-) de este índice, indicarán que la calcita  $\text{CaCO}_3$  se disolverá en el agua de riego, es decir, el carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$ , en el agua de riego se encontrara en forma disociada formando iones de calcio  $\text{Ca}^{2+}$  e iones bicarbonato  $\text{HCO}_3^-$ . La ecuación de Langelier<sup>21,22</sup> para calcular el  $\text{pH}_c$  de los análisis químicos de las aguas de riego es:

$$\text{pH}_c = (\text{pk}_2' - \text{pk}_c') + \text{pCa} + \text{pAlk}$$

Donde:  $\text{pCa} + \text{pAlk}$ , son los logaritmos negativos de la concentración molar del  $\text{Ca}^{2+}$  y de la concentración equivalente de las bases titulables ( $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ ) respectivamente;  $\text{pk}_2' - \text{pk}_c'$ , son los logaritmos negativos de la segunda constante de disociación del ácido carbónico  $\text{H}_2\text{CO}_3$  y la constante de solubilidad del carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$  respectivamente, ambos corregidos por su fuerza iónica (I).

Bower, 1965<sup>22</sup> y Pratt *et al.*, 1969<sup>114</sup>; en lisímetros experimentales de invernadero encontraron que una fracción de bicarbonatos  $\text{HCO}_3^-$  aplicados en aguas de riego se precipitaron en el suelo y que ampliamente esta precipitación está relacionada con una modificación del índice de saturación de Langelier<sup>77</sup>.

Esta modificación del índice de saturación de Langelier; consiste simplemente en sustituir el pH de un suelo que tiene propiedades buffer, por el pH actual del agua de riego ( $\text{pH}_a$ ) con propiedades buffer pequeñas, de tal manera que, aunque la ecuación de Langelier fue derivada para un sistema cerrado. Bower, 1965<sup>22</sup> y Pratt *et al.*, 1969<sup>114</sup>, en lisímetros de invernadero en un sistema abierto, señalan que la aplicación de una agua de riego a un suelo, de un valor de pH cualquiera, puede entonces por lo tanto calcularse los valores del pH teórico ( $\text{pH}_c$ ), como una medida de la tendencia del carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$  a precipitarse en la solución acuosa.

La corrección por fuerza iónica (I) de los valores de  $\text{pk}_2'$  y  $\text{pk}_c'$ , son los logaritmos negativos de la segunda constante de disociación del ácido carbónico y la constante de solubilidad de la calcita  $\text{CaCO}_3$ , se llevó a cabo de acuerdo con la ecuación de Debye y Hückel con una determinada fuerza iónica (I). De tal manera que para el cálculo<sup>22,135</sup> de ( $\text{pk}_2'$  y  $\text{pk}_c'$ ) y el cálculo de (I) se utilizarán las siguientes ecuaciones:

$$(\text{pk}_2' - \text{pk}_c') = \left\{ 2.0269 + \left[ 0.5092 \left( \frac{4.0(\text{I})^{1/2}}{1.0 + 2.0(\text{I})^{1/2}} + \frac{(\text{I})^{1/2}}{1.0 + 1.45(\text{I})^{1/2}} \right) \right] \right\}$$

El último término de esta ecuación expresa y proporciona la corrección de Debye y Hückel para una fuerza iónica determinada (I).

El número 2.0269 es la diferencia entre  $\text{pk}_2'$  y  $\text{pk}_c'$ ; utilizando  $k_2=4.7 \times 10^{-11}$  y  $k_c=5.0 \times 10^{-9}$  como los valores numéricos de estas constantes.

## Calculo de los valores del pH teórico (pH<sub>c</sub>) de las aguas residuales

En primer lugar se calcula una serie de pH's teóricos (pH<sub>c</sub>) para diferentes concentraciones expresadas en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> para los parámetros pk<sub>2</sub>'- pk<sub>c</sub>', pCa y pAlk.

Las concentraciones de cationes expresadas en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> que se utilizan en estos cálculos son: 0.1-100 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>. En el Cuadro 10, se presentan los valores de las diferentes variables para construir una gráfica y así facilitar el cálculo del pH teórico (pH<sub>c</sub>) derivado de los análisis químicos de las aguas<sup>22</sup>.

La construcción de esta gráfica teórica (Figura 2) se realizó en papel semilogarítmico, en el que en el eje logarítmico (y) se colocan las concentraciones molares de calcio y las concentraciones de las bases titulables (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>+ HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) expresadas en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, y en el eje de las (x), escala aritmética en el sistema decimal, se colocan las concentraciones totales de cationes de las aguas de riego expresadas en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>.

Cuadro 10. Calculo de los valores de pH<sub>c</sub> teórico de las aguas de riego.

Concentración (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	pH <sub>c</sub> = (pk <sub>2</sub> - pk <sub>c</sub> ) + pCa + (pAlk) <sup>*</sup>		
	pk <sub>2</sub> - pk <sub>c</sub>	pCa	pAlk
0.10	2.0897	4.3010	4.0000
0.20	2.0955	4.0000	3.6990
0.30	2.1007	3.8239	3.5229
0.40	2.1055	3.6990	3.3979
0.50	2.1100	3.6021	3.3010
0.60	2.1142	3.5229	3.2218
0.70	2.1182	3.4559	3.1549
0.80	2.1220	3.3979	3.0969
0.90	2.1256	3.3468	3.0458
1.00	2.1290	3.3010	3.0000
2.00	2.1576	3.0000	2.6990
3.00	2.1797	2.8239	2.5229
4.00	2.1980	2.6990	2.3979
5.00	2.2139	2.6021	2.3010
6.00	2.2281	2.5229	2.2218
7.00	2.2408	2.4559	2.1549
8.00	2.2525	2.3979	2.0969
9.00	2.2633	2.3468	2.0458
10.0	2.2733	2.3010	2.0000
11.0	2.2827	2.2596	1.9586
12.0	2.2915	2.2218	1.9208
13.0	2.2999	2.1871	1.8861
14.0	2.3078	2.1549	1.8539
15.0	2.3154	2.1249	1.8239
16.0	2.3226	2.0969	1.7959
17.0	2.3295	2.0706	1.7696
18.0	2.3361	2.0458	1.7447
19.0	2.3424	2.0223	1.7212
20.0	2.3486	2.0000	1.6990
21.0	2.3545	1.9788	1.6778
22.0	2.3602	1.9586	1.6576
23.0	2.3657	1.9393	1.6383
24.0	2.3710	1.9208	1.6198
25.0	2.3762	1.9031	1.6021
26.0	2.3813	1.8861	1.5850
27.0	2.3861	1.8697	1.5686
28.0	2.3909	1.8539	1.5528
29.0	2.3955	1.8386	1.5376
30.0	2.4000	1.8239	1.5229
31.0	2.4044	1.8097	1.5086
32.0	2.4087	1.7959	1.4949
33.0	2.4129	1.7825	1.4815
34.0	2.4170	1.7696	1.4685
35.0	2.4210	1.7570	1.4559
36.0	2.4249	1.7447	1.4437
37.0	2.4287	1.7328	1.4318
38.0	2.4325	1.7212	1.4202
39.0	2.4361	1.7100	1.4089
40.0	2.4397	1.6990	1.3979
41.0	2.4432	1.6882	1.3872
42.0	2.4467	1.6778	1.3768
43.0	2.4501	1.6676	1.3665
44.0	2.4534	1.6576	1.3565
45.0	2.4567	1.6478	1.3468
46.0	2.4599	1.6383	1.3372
47.0	2.4630	1.6289	1.3279
48.0	2.4661	1.6198	1.3188
49.0	2.4692	1.6108	1.3098
50.0	2.4722	1.6021	1.3010



...Cuadro 10

Concentración (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	pH <sub>c</sub> = (pk <sub>2</sub> - pk <sub>c</sub> ) + pCa + (pAlk) <sup>*</sup>		
	pk <sub>2</sub> - pk <sub>c</sub>	pCa	pAlk
51.0	2.4751	1.5935	1.2924
52.0	2.4780	1.5850	1.2840
53.0	2.4808	1.5768	1.2757
54.0	2.4837	1.5686	1.2676
55.0	2.4864	1.5607	1.2596
56.0	2.4891	1.5528	1.2518
57.0	2.4918	1.5452	1.2441
58.0	2.4945	1.5376	1.2366
59.0	2.4971	1.5302	1.2291
60.0	2.4997	1.5229	1.2218
61.0	2.5022	1.5157	1.2147
62.0	2.5047	1.5086	1.2076
63.0	2.5072	1.5017	1.2007
64.0	2.5096	1.4949	1.1938
65.0	2.5120	1.4881	1.1871
66.0	2.5144	1.4815	1.1805
67.0	2.5167	1.4750	1.1739
68.0	2.5190	1.4685	1.1675
69.0	2.5213	1.4622	1.1612
70.0	2.5235	1.4559	1.1549
71.0	2.5258	1.4498	1.1487
72.0	2.5280	1.4437	1.1427
73.0	2.5301	1.4377	1.1367
74.0	2.5323	1.4318	1.1308
75.0	2.5344	1.4260	1.1249
76.0	2.5365	1.4202	1.1192
77.0	2.5386	1.4145	1.1135
78.0	2.5406	1.4089	1.1079
79.0	2.5426	1.4034	1.1024
80.0	2.5446	1.3979	1.0969
81.0	2.5466	1.3925	1.0915
82.0	2.5486	1.3872	1.0862
83.0	2.5505	1.3820	1.0809
84.0	2.5525	1.3768	1.0757
85.0	2.5544	1.3716	1.0706
86.0	2.5562	1.3665	1.0655
87.0	2.5581	1.3615	1.0605
88.0	2.5599	1.3565	1.0555
89.0	2.5618	1.3516	1.0506
90.0	2.5636	1.3468	1.0458
91.0	2.5654	1.3420	1.0410
92.0	2.5671	1.3372	1.0362
93.0	2.5689	1.3325	1.0315
94.0	2.5706	1.3279	1.0269
95.0	2.5723	1.3233	1.0223
96.0	2.5740	1.3188	1.0177
97.0	2.5757	1.3143	1.0132
98.0	2.5774	1.3098	1.0088
99.0	2.5791	1.3054	1.0044
100.0	2.5807	1.3010	1.0000

Fuente: Bower *et al.*, 1965

\* Entrando en la primera columna con las concentraciones en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>. a. Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>+Na<sup>+</sup>; b. Ca<sup>2+</sup> y; c. CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>+ HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, se obtienen los valores de (pk<sub>2</sub>-pk<sub>c</sub>), pCa y p(Alk) respectivamente.

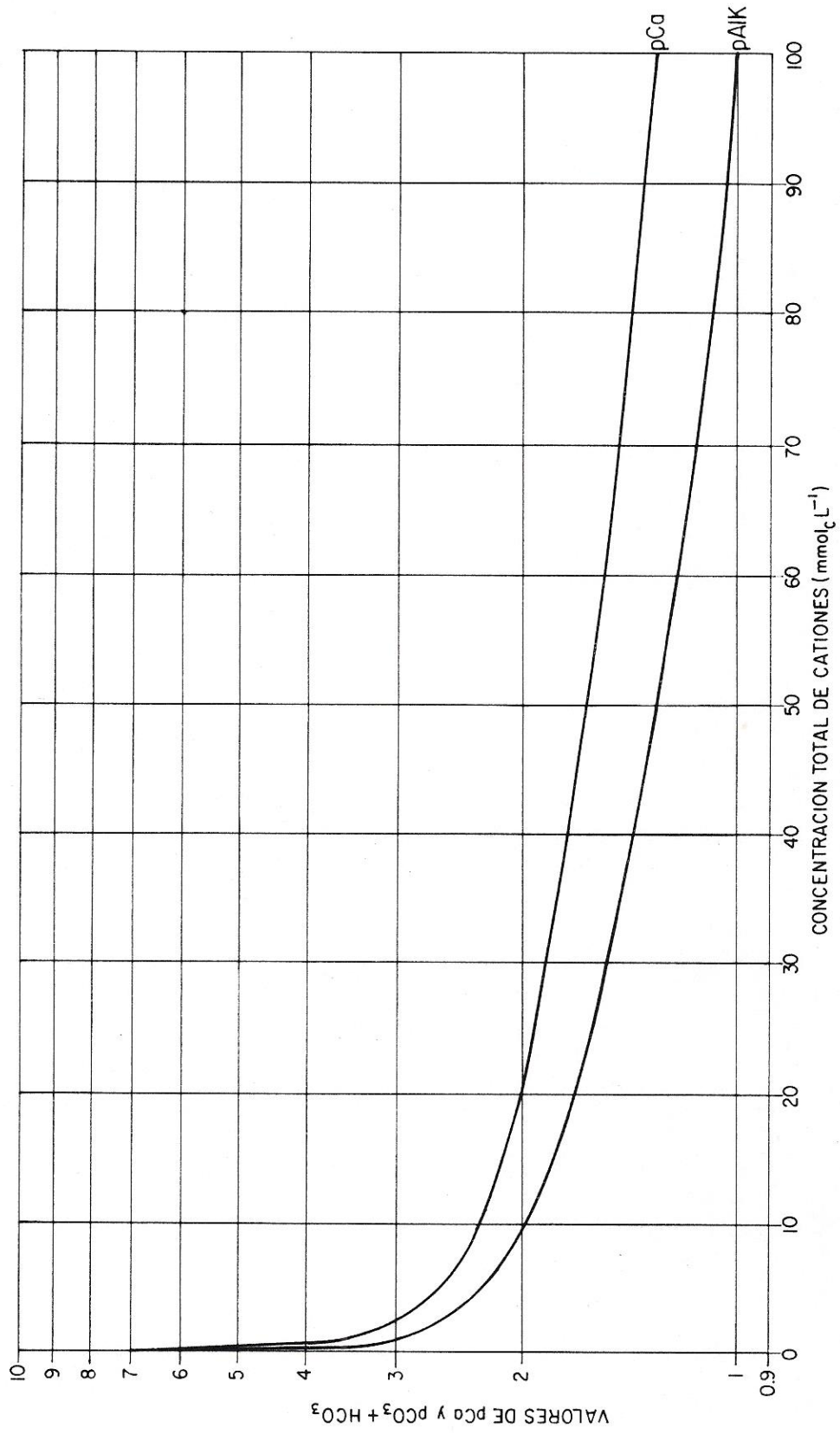


Figura 2. Valores de los logaritmos negativos de las concentraciones molares de pCa y equivalentes de  $\text{pCO}_3 + \text{HCO}_3$  con respecto a las concentraciones totales de cationes expresados en  $\text{mmolc L}^{-1}$ .

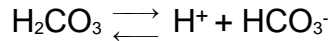
La fuerza iónica y la concentración total de las aguas naturales están ampliamente correlacionadas<sup>22</sup>. Un estudio estadístico de estas variables derivó en la siguiente ecuación de regresión:

$$1000(I) = 1.3477C + 0.5355$$

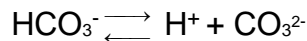
Donde: C, es la concentración total de cationes de un agua de riego determinada expresada en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>; I, es la fuerza iónica de un agua expresada en M L<sup>-1</sup>.

Los valores de la fuerza iónica (I) que se obtuvieron de esta ecuación, fueron introducidos en la ecuación expuesta arriba (pk<sub>2</sub>' - pk<sub>c</sub>').

Las constantes de disociación del ácido carbónico H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> son las siguientes:



$$K_1 = \frac{(\text{H}^+)(\text{HCO}_3^-)}{(\text{H}_2\text{CO}_3)} = 4.2 \times 10^{-7}$$



$$K_2 = \frac{(\text{H}^+)(\text{CO}_3^{2-})}{(\text{HCO}_3^-)} = 4.2 \times 10^{-11}$$

La segunda constante de disociación del H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> es la que más nos interesa, porque es la que representa la disociación del HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> para formar CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, que posteriormente este se asocia con el Ca<sup>2+</sup> para formar el CaCO<sub>3</sub>. La constante de solubilidad de la calcita (k<sub>c</sub>) es:



$$k_c = [\text{Ca}^{2+}] [\text{CO}_3^{2-}] = 5.0 \times 10^{-9}$$

La ecuación de equilibrio en soluciones acuosas en sistemas abiertos que contienen calcita es la siguiente: CaCO<sub>3</sub> + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O  $\rightleftharpoons$  Ca<sup>2+</sup> + 2HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

#### 4.7.2.5 Relación de adsorción de sodio corregido (RAS°)

Como la relación de adsorción de sodio RAS sigue siendo el único parámetro para predecir los niveles de sodio intercambiable en los suelos, y si se toman en cuenta, las consideraciones que han sugerido diferentes autores para señalar las variaciones de las cantidades de los iones de calcio en las soluciones acuosas y de los suelos, así como Suárez, 1981<sup>143</sup> propuso una corrección a la forma de tomar en cuenta la concentración de los iones de calcio que llamo  $RAS_{corr}=RAS^\circ$ , cuando este valor se introduce en la fórmula del RAS. Este autor señala que la presión parcial del bióxido de carbono  $CO_2$  del aire en los primeros milímetros del suelo debe tomarse en cuenta. Y propone que la presión parcial del bióxido de carbono debe ser de 0.0007 atmósferas ó 0.07 kPa.

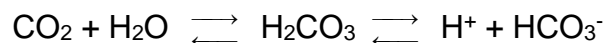
La fórmula de la relación de adsorción de sodio o RAS que toma en cuenta la presión parcial del bióxido de carbono  $CO_2$  se representa como sigue:

$$RAS^\circ = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}}$$

Donde:  $RAS^\circ$  es el valor del RAS de una agua de riego que toma en cuenta la presión parcial del  $CO_2$   $P_{CO_2}=0.0007$  atmósferas y una relación determinada de  $HCO_3^-/Ca$ ;  $C_{Na^+}$ ,  $C_{Ca^{2+}}$ ,  $C_{Mg^{2+}}$  son las concentraciones de estos iones expresadas en  $mmol_c L^{-1}$ .

Para calcular la concentración de calcio ( $Ca^\circ$ ) que debe introducirse en la fórmula de la relación de adsorción de sodio, se toma en cuenta la relación  $HCO_3^-/Ca^{2+}$ , expresada en  $mmol_c L^{-1}$  y la conductividad eléctrica, expresada en  $mS cm^{-1}$  de las aguas de riego que se aplican a los suelos<sup>14</sup>. (Cuadro 11)

La solubilidad del bióxido de carbono en el agua de riego se representa como sigue:



Y el sistema carbonato-bicarbonato de disolución o precipitación de la calcita se representa como sigue:



Cuadro 11. Concentración de calcio ( $\text{Ca}^\circ$ ) en el agua del suelo, contenido en el suelo cerca de la superficie, que resultaría de regar con aguas de determinado valor  $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$  y conductividad del agua de riego (CE)<sup>a,b</sup>.

	SALINIDAD DEL AGUA DE RIEGO APLICADA CE mS cm <sup>-1</sup>												
	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0	
0.05	13.2	13.61	13.92	14.4	14.79	15.26	15.91	16.43	17.28	17.97	19.07	19.94	
0.10	8.30	8.57	8.77	9.07	9.31	9.62	10.02	10.35	10.89	11.32	12.01	12.56	
0.15	6.34	6.54	6.69	6.92	7.11	7.34	7.65	7.9	8.31	8.64	9.17	9.58	
0.20	5.24	5.40	5.52	5.71	5.87	6.06	6.31	6.52	6.86	7.13	9.57	7.91	
0.25	4.51	4.65	4.76	4.92	5.06	5.22	5.44	5.62	5.91	6.15	6.52	6.82	
0.30	4.00	4.12	4.21	4.36	4.48	4.62	4.82	4.98	5.24	5.44	5.77	6.04	
0.35	3.61	3.72	3.80	3.94	4.04	4.17	4.35	4.49	4.72	4.91	5.21	5.45	
0.40	3.30	3.40	3.48	3.60	3.70	3.82	3.98	4.11	4.32	4.49	4.77	4.98	
0.45	3.05	3.14	3.22	3.33	3.42	3.53	3.68	3.80	4.00	4.15	4.41	4.61	
0.50	2.84	2.93	3.00	3.10	3.19	3.29	3.43	3.54	3.72	3.87	4.11	4.30	
0.75	2.17	2.24	2.29	2.37	2.43	2.51	2.62	2.7	2.84	2.95	3.14	3.28	
1.00	1.79	1.85	1.89	1.96	2.01	2.09	2.16	2.23	2.35	2.44	2.59	2.71	
Valor de $\frac{\text{HCO}_3^-}{\text{Ca}^{2+}}$	1.25	1.54	1.59	1.63	1.68	1.73	1.78	1.86	1.92	2.02	2.1	2.23	2.33
	1.50	1.37	1.41	1.44	1.49	1.53	1.58	1.65	1.70	1.79	1.86	1.97	2.07
1.75	1.23	1.27	1.30	1.35	1.38	1.43	1.49	1.54	1.62	1.68	1.78	1.86	
2.00	1.13	1.16	1.19	1.23	1.26	1.31	1.36	1.40	1.48	1.58	1.63	1.70	
2.25	1.04	1.08	1.10	1.14	1.17	1.21	1.26	1.3	1.37	1.42	1.51	1.58	
2.50	0.97	1.00	1.02	1.06	1.09	1.12	1.17	1.21	1.27	1.32	1.4	1.47	
3.00	0.85	0.89	0.91	0.94	0.96	1.00	1.04	1.07	1.13	1.17	1.24	1.30	
3.50	0.78	0.80	0.82	0.85	0.87	0.90	0.94	0.97	1.02	1.06	1.12	1.17	
4.00	0.71	0.73	0.75	0.78	0.80	0.82	0.86	0.88	0.93	0.97	1.03	1.07	
4.50	0.66	0.68	0.69	0.72	0.74	0.76	0.79	0.82	0.86	0.9	0.95	0.99	
5.00	0.61	0.63	0.65	0.67	0.69	0.71	0.74	0.76	0.8	0.83	0.88	0.93	
7.00	0.49	0.50	0.52	0.53	0.55	0.57	0.59	0.61	0.64	0.67	0.71	0.74	
10.00	0.39	0.40	0.41	0.42	0.43	0.45	0.47	0.48	0.51	0.53	0.56	0.58	
20.00	0.24	0.25	0.26	0.26	0.27	0.28	0.29	0.30	0.32	0.33	0.35	0.37	
30.00	0.18	0.19	0.20	0.20	0.21	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.27	0.28	

Fuente: Suárez, 1981

<sup>a</sup>. Supone: a. Una fuente de calcio proveniente de silicatos o caliza  $\text{CaCO}_3$ , b. no existe precipitación del magnesio y, c. la presión relativa del  $\text{CO}_2$  de la superficie del suelo es de 0.0007 atmósferas.

<sup>b</sup>.  $\text{Ca}^\circ$ ,  $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$  están expresados en  $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$  y la CE, está expresada en  $\text{mS cm}^{-1}$

#### **4.7.2.6 La fuerza iónica como parámetro fundamental para calcular el coeficiente de actividad de cada ion en una solución salina**

El concepto de fuerza iónica está fundamentado en la química de los electrolitos. La fuerza iónica proporciona el medio para calcular las actividades iónicas tanto de una sal única en una solución o de una sal en presencia de otros electrolitos. Un aspecto de gran importancia del principio de fuerza iónica, es que el coeficiente de actividad de un ion, es el mismo en todas las soluciones de un mismo valor de la fuerza iónica<sup>7,42,51,74,79,94,110,117</sup>.

Por eso, las correcciones de las soluciones por fuerza iónica (I) son indispensables, porque con esto, se nos permite conocer los coeficientes de actividad de los diferentes iones de las soluciones acuosas.

La fuerza iónica de una solución electrolítica, es una medida de la intensidad del campo eléctrico en la solución y se define como:

$$I = \frac{1}{2} \sum C_i Z_i^2$$

Donde:  $C_i$ , es la concentración molar real de cada ion en la solución en  $M L^{-1}$ ;  $Z_i$ , es la valencia de cada ion ( $n^+$ ,  $n^-$ ).

Es necesario conocer las concentraciones de todos los iones, para determinar los valores de la fuerza iónica.

#### **Coeficientes de actividad individual de los diferentes iones**

Cuando la fuerza iónica es conocida, los coeficientes de actividad de los iones pueden ser calculados. El concepto de actividad de un ion individual es mucho más útil en las soluciones de los suelos, que el concepto de actividad media. Estos principios han sido utilizados por muchos años en las mediciones del pH.

El coeficiente de actividad de un ion en la solución  $f_i$  esta definido por la ecuación de Debye y Hückel<sup>4,50,103</sup> como sigue:

$$-\log f_i = \frac{AZ_i^2(I)^{1/2}}{1 + Bai(I)^{1/2}}$$

Donde: A y B, son constantes dependientes de la temperatura ( $^{\circ}t$ ); I, es la fuerza iónica de la solución ( $M L^{-1}$ );  $a_i$ , es un parámetro que se debe al tamaño de cada ion. ( $\text{Å}$ );  $f_i$ , es el coeficiente de actividad del ion  $i$

Los valores de A, B y  $a_i$  se presentan en el Cuadro 12; por lo tanto, solamente es necesario conocer la fuerza iónica (I) de una solución, para efectos de calcular el coeficiente de actividad de cualquier ion<sup>4</sup>.

Cuadro 12. Parámetros individuales del tamaño de los iones ( $a_i$ ), expresados en unidades de Angstrom ( $\text{Å}$ ) para ser introducidos en la ecuación de Debye y Hückel para el cálculo de los coeficientes de actividad de cualquier ion.

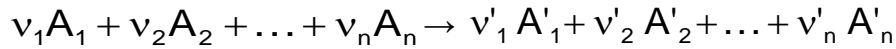
Ion	Valor de $a_i$
H <sup>+</sup> , Al <sub>3</sub> <sup>+</sup> , Fe <sub>3</sub> <sup>+</sup>	9.0
Mg <sup>2+</sup>	8.0
Li <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Cu <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Mn <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup>	6.0
Sr <sup>2+</sup> , Ba <sup>2+</sup>	5.0
Na <sup>+</sup> , CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	4.0, 4.41-5.0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	4.0
OH <sup>-</sup> , F <sup>-</sup>	3.0, 5.0
K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3.0
Rb <sup>+</sup> , Cs <sup>+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	2.0, 5.0

Fuente: Adams, 1971

Otras constantes para la ecuación de Debye y Hückel es una escala molar en 25°C con: A=0.509; B=0.329, son tamaños de radio iónico ( $a_i$ ) expresados en Angstrom ( $\text{Å}$ ).

#### 4.7.2.7 Sales hipotéticas

Para entender como se calcula la fuerza iónica de una sal o de iones de diferentes sales en solución en principio, se debe comprender que cualquier reacción química se puede representar de la forma siguiente<sup>51</sup>:



Donde:  $v_1$  y  $v_n$ , son los coeficientes estequiométricos de los compuestos iniciales y finales;  $A_1$  y  $A_n$ ; son las sustancias iniciales y finales.

Y para el caso de la disociación electrolítica de una sal cualquiera, entonces, esta disociación transcurre de acuerdo con la siguiente ecuación:



Donde:  $v_+$  y  $v_-$ , son los números de cationes y aniones respectivamente;  $z_{1+}$  y  $z_{2-}$ , son los números de las cargas o números de valencia ( $n^+$ ,  $n^-$ )

En una solución electrolítica, la influencia total de una mezcla de sales de una solución, sobre el coeficiente de actividad de cada una de estas sales será una regularidad común, si la concentración total de las sales de la solución se expresa en términos de fuerza iónica (I).

Se llama fuerza iónica (I) de una solución a la semisuma de los productos de las concentraciones de cada ion por el cuadrado del número de sus cargas  $z$  (valencia), tomada para todos los iones de una solución determinada. Si se emplea la molaridad como medida de la concentración, la fuerza iónica de la solución quedará expresada:

$$I = \frac{1}{2} \sum_i m_i z_i^2$$

Donde: I, es la fuerza iónica de una solución ( $M L^{-1}$ );  $m$ , es la molaridad de cada ion ( $M L^{-1}$ );  $z$ , es la valencia de cada ion ( $n^+$ ,  $n^-$ );  $i$ , es el subíndice de los iones de todas las sales en la solución y dado que para cada ion  $m_i = v_i m_k$  (donde  $m_k$  es la molaridad de la sal), entonces, para una sal determinada se tendrá:

$$m_+ z_+^2 + m_- z_-^2 = (v_+ z_+^2 + v_- z_-^2) m_k = 2s_k m_k$$



Por consiguiente, en la suma I entrará la molaridad  $m_k$  de cada sal multiplicada por  $s_k = \frac{1}{2}(v_+ z_+^2 + v_- z_-^2)$ . Este último factor es constante para sustancias disociadas con un tipo de valencia. Por lo tanto es más conveniente calcular la fuerza iónica definida por:

$$I = \frac{1}{2} \sum_i m_i z_i^2$$

En términos de la siguiente ecuación:

$$I = \frac{1}{2} \sum_k 2s_k m_k = \sum_k s_k m_k$$

Los valores de  $s_k$  para las sales hipotéticas de diferentes tipos de valencia se presentan en el Cuadro 13<sup>51</sup>.

Cuadro 13. Valores de  $s_k$  para sales hipotéticas de diferentes tipos de valencia.

Tipo de valencia	Sal hipotética	$s_k$
1-1	NaCl	1
1-1	NaHCO <sub>3</sub>	1
1-2	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	3
1-2	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3
2-1	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	3
2-1	CaCl <sub>2</sub>	3
2-2	CaCO <sub>3</sub>	4
2-2	CaSO <sub>4</sub>	4
2-1	MgCl <sub>2</sub>	3
2-2	MgCO <sub>3</sub>	4
2-2	MgSO <sub>4</sub>	4
2-1	Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	3
1-1	KCl	1
1-1	KHCO <sub>3</sub>	1
1-2	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3
1-2	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	3

Fuente: Guerasimov *et al.*, 1971

#### 4.7.2.8 Problemas de infiltración de suelos bajo riego

Un problema de infiltración en los suelos se presenta cuando el agua de riego no atraviesa la superficie del suelo a una velocidad lo suficientemente rápida, como para no permitir que se restituya el agua que se ha consumido por los cultivos agrícolas en diferentes riegos. Esta disminución en la velocidad de paso del agua a través del suelo se debe a modificaciones del medio poroso de los suelos<sup>92</sup>.

Los factores de calidad del agua que suelen influir en la infiltración son el contenido total de sales y el contenido de sodio en relación a los contenidos de calcio y magnesio. Una alta salinidad aumenta la velocidad de infiltración, mientras que una baja salinidad, o una proporción alta de sodio sobre el calcio, la disminuyen. Ambos factores (salinidad y proporción de sodio) pueden actuar al mismo tiempo.

Los problemas de infiltración ocasionados por la mala calidad del agua ocurren por lo general en los primeros centímetros del suelo y están ligados con la estabilidad estructural del suelo y con el contenido de sodio en relación al calcio<sup>14</sup>.

Una velocidad de infiltración de 3 mm h<sup>-1</sup> es considerada baja, mientras que una infiltración por encima de 12 mm h<sup>-1</sup> es relativamente alta. Además de la cantidad de agua, la infiltración está determinada por las características físicas del suelo, como la textura, estructura, grado de compactación, contenido de materia orgánica, tipo de minerales de la arcilla y por sus características químicas, incluyendo los cationes intercambiables.

La dispersión de los suelos y la destrucción de su estructura se producen únicamente cuando el contenido de sodio supera al del calcio en una proporción por encima de 3:1. Este contenido relativo de sodio provoca serios problemas de infiltración de la misma manera que una salinidad muy baja del agua. Esto se debe a la falta de suficiente calcio para contrarrestar los efectos dispersantes del sodio. La Figura 3 es utilizada para mostrar que tanto la salinidad del agua (CE) como su relación de adsorción de sodio (RAS) afectan la velocidad de infiltración<sup>14,76,154</sup>.

El tipo y la cantidad de cationes adsorbidos influyen de manera importante en las propiedades físicas y químicas de los suelos, por ejemplo el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Na}^+$  tienen una influencia directa en la estructura de los suelos. De este modo, el  $\text{Ca}^{2+}$  al ser un buen coagulante favorece como consecuencia la formación de flóculos, permitiendo que el suelo tenga una estructura granulada, bien desarrollada y estable, en cambio el ion  $\text{Na}^+$  dispersa a las partículas coloidales de los suelos<sup>46</sup> (Cuadro 14).

Cuadro 14. Influencia de los cationes adsorbidos en las diferentes propiedades físicas de los suelos.

Propiedad de los suelos	Actividad relativa
1 Dispersión	$\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Al}$
2 Máxima higroscopicidad	$\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Al}$
3 Velocidad de infiltración	$\text{Na} < \text{K} < \text{Mg} < \text{Ca} < \text{Al}$
4 Ascensión capilar	$\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Al}$
5 Plasticidad	$\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Al}$
6 Resistencia de los agregados	$\text{Na} < \text{K} < \text{Mg} < \text{Ca} < \text{Al}$
7 Reacción de la solución (pH)	$\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Al}$
8 Hinchamiento	$\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Al}$
9 Velocidad de absorción del agua	$\text{Na} < \text{K} < \text{Mg} < \text{Ca} < \text{Al}$
10 Adherencia	$\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Al}$
11 Disociación de coloides	$\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Al}$
12 Compresibilidad cuando se tiene deshidratación	$\text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Al}$

Fuente: Gorbunov, 1967

Por ejemplo, al analizar la dispersión, cuando el complejo de intercambio catiónico está saturado con un solo tipo de catión se observara que el suelo saturado con sodio (Na) se disemina más que el suelo que está saturado con potasio (K), y este suelo se esparcirá más que el suelo saturado con magnesio (Mg) y así sucesivamente. De esta misma manera se comporta la ascensión capilar, la compresibilidad cuando se tiene deshidratación de plasticidad, el hinchamiento, etc. En dirección contraria cambia la velocidad de infiltración, la velocidad de absorción, etc.

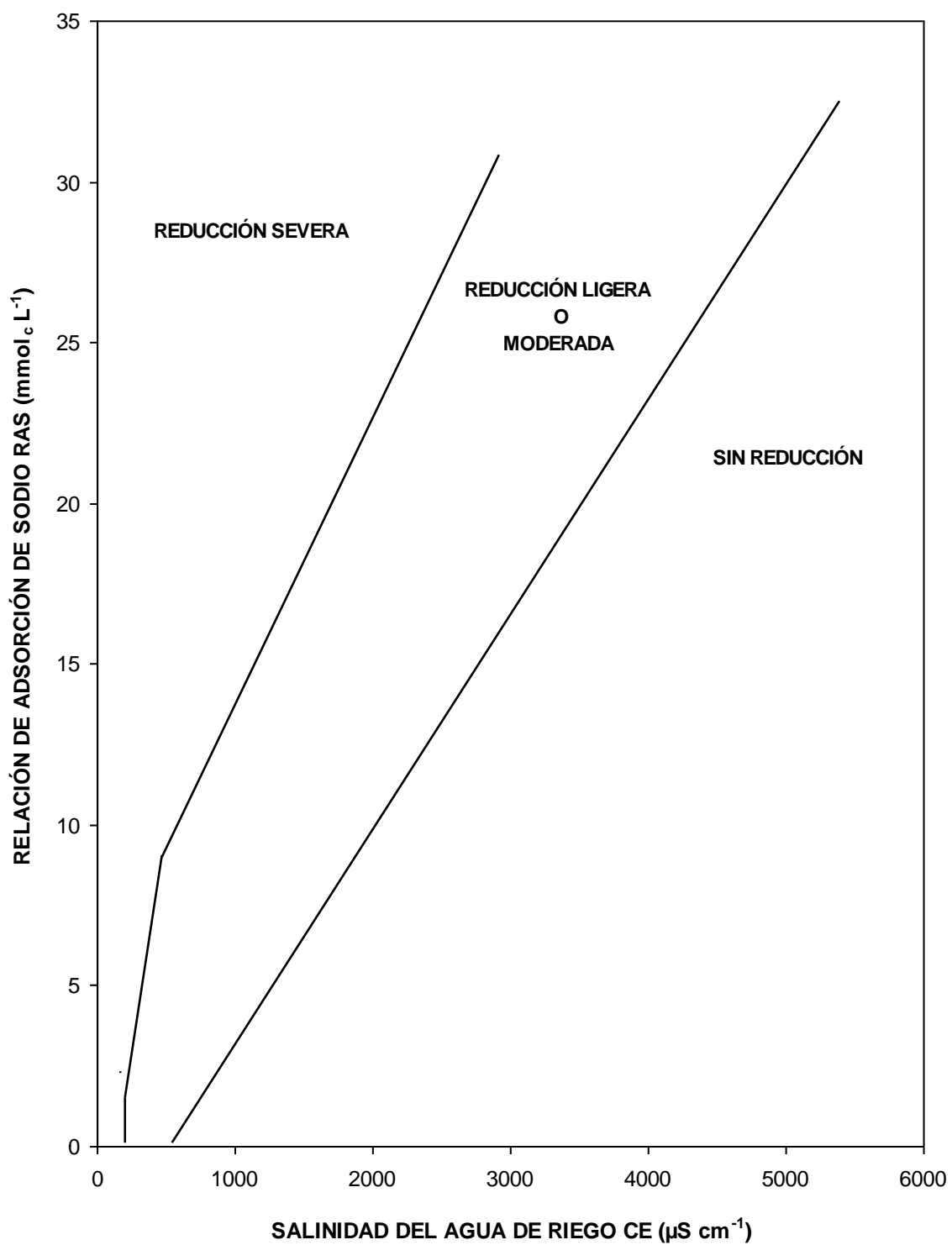


Figura 3. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio.

#### **4.7.2.9 Carbonato de sodio residual (CSR)**

En los inicios de estudios sobre la calidad de las aguas superficiales y subterráneas para riego, se observó experimentalmente que los distintos tipos de aguas se infiltraban de manera diferente en los suelos agrícolas bajo riego; y como consecuencia de estas observaciones, se estableció que sus variadas composiciones químicas afectaban de manera diferente las propiedades físicas de los suelos. Por lo que en ese tiempo se mencionaba que “aguas duras” hacen suelos blandos y “aguas blandas” hacen suelos duros. Hoy se sabe que las “aguas blandas”, ricas en bicarbonato de sodio propician considerablemente la acumulación de sodio intercambiable en los suelos. Uno de los procedimientos utilizados en el pasado para determinar los posibles problemas de infiltración fue el método del carbonato de sodio residual.

Las aguas de baja calidad han sido usadas para riego en muchas regiones áridas y semiáridas, debido a la ausencia de fuentes limitadas de aguas de buena calidad. A veces las aguas subterráneas que están disponibles para el riego, tienen altos contenidos de carbonato de sodio residual. El uso indiscriminado de estas aguas en la irrigación a veces causa una acumulación excesiva de sales, y conduce a una rápida salinización y sodificación del perfil del suelo, procesos que afectan adversamente el desarrollo de cultivos<sup>1,5,17,26,98,116,145,156</sup>. Sin embargo, se debe señalar que, los efectos de la sodicidad en el desarrollo de los cultivos son diferentes de aquellos efectos que derivan de la salinización<sup>111</sup>.

Las salinidades causan una reducción en el crecimiento de las plantas; debido al gasto de energía en la generación de osmólitos celulares, para generar un gradiente de potencial del agua adecuado, para contrarrestar el potencial del agua del suelo generado por sales disueltas en las soluciones de suelos<sup>78</sup>, mientras que los efectos de la sodicidad, afecta el crecimiento y desarrollo de plantas de manera negativa a través de su influencia sobre las propiedades físicas e hidrológicas de suelos. Los procesos de salinización y de sodificación afectan el rendimiento de cultivos debido a desordenes nutricionales y efectos tóxicos<sup>92</sup>.

En suelos sódicos se incrementa el sodio intercambiable, y por lo tanto, considerables aumentos de sodio intercambiable conduce a deficiencias de calcio y magnesio. La tolerancia de los cultivos a las aguas sódicas de riego depende de la sodicidad total de los suelos, de la habilidad de los cultivos a la tolerancia de la sodicidad<sup>2</sup>, de prácticas agronómicas de manejo y condiciones climáticas durante los ciclos vegetativos de los cultivos.

Eaton, 1950<sup>38</sup> consideró que la precipitación de Ca y Mg en forma de carbonatos de calcio y de magnesio, propician una acumulación considerable de sodio intercambiable en los suelos que aquellas aguas que no son sódicas, es decir, que poseen pequeñas cantidades de bicarbonatos, propuso el concepto de carbonato de sodio residual, para evaluar las aguas de riego que tienen cantidades considerables de carbonatos y bicarbonatos.

### **Experimentos que se han llevado a cabo con aguas de diferente contenido de carbonato de sodio residual**

En los últimos tiempos se ha observado que las aguas de riego que se utilizan en las zonas áridas y semiáridas<sup>8,58,61,62,63,81,129</sup> poseen elevadas concentraciones de sales, y que a su vez, contienen considerables concentraciones de bicarbonatos. Ejemplos de estos tipos de aguas se tienen en Pakistán (Punjab), India (zona del Noroeste), Estados Unidos (Fresno y Valle Imperial) y México (zonas del Bajío).

Los orígenes de los bicarbonatos y de algunas cantidades de carbonato están relacionados con los yacimientos basálticos profundos en los cuales por procesos de intemperismo las aguas de estos yacimientos acuíferos se enriquecen con bicarbonatos y algunas fracciones de carbonatos. Las aguas urbano-industriales que riegan el Valle del Mezquital contienen cantidades variables de carbonato de sodio residual.

De los trabajos de investigación que se han analizado aquí se puede señalar que las aguas sódicas de yacimientos profundos se utilizan para el riego de cultivos agrícolas con diferentes valores de carbonato de sodio residual.

Sin embargo, es necesario señalar que es indispensable mejorar las aguas sódicas con diferentes aplicaciones de yesos agrícolas como fuentes de iones de calcio  $\text{Ca}^{2+}$ .

Sharma y Minhas, 1998<sup>134</sup>, han señalado que las aguas sódicas, sin aplicar ningún mejoramiento, afectan severamente las propiedades físicas de los suelos y también a su vez indican que los cultivos son sensiblemente afectados. Sin embargo, esto no ha sido motivo para no utilizar las aguas sódicas en el riego de cultivos agrícolas<sup>63,112</sup>.

Estos autores condujeron experimentos con una rotación de cultivos de algodón-trigo, por cuatro años aplicando aguas sódicas a los suelos con valores de salinidad y sodicidad de  $\text{CE}=4 \text{ mS cm}^{-1}$ ,  $\text{RAS}<30$  y  $\text{CSR}<10 \text{ mmolc L}^{-1}$ . Las condiciones ambientales en las que se concluyeron estos experimentos fueron: buen drenaje 0.33 de fracción de lavado y 750 mm de precipitación. Solamente en el quinto año después de aplicar estas aguas se inicio una disminución de los rendimientos del algodón y del trigo.

Choundray *et al.*, 2001<sup>30</sup>; investigaron la aplicación de aguas de riego con diferentes valores de carbonato residual en el riego de distintos cultivares de algodón. Las concentraciones de sales solubles y de carbonato de sodio residual fueron las siguientes: 1.  $\text{CE}=290 \text{ }\mu\text{S cm}^{-1}$  y  $\text{CSR}=0$ ; 2.  $\text{CE}=1600 \text{ }\mu\text{S cm}^{-1}$  y  $\text{CSR}=5, 1$ ; 3.  $\text{CE}=1400 \text{ }\mu\text{S cm}^{-1}$  y  $\text{CSR}=10$ ; 4.  $\text{CE}=1450 \text{ }\mu\text{S cm}^{-1}$  y  $\text{CSR}=15.1$ . Después de regar el algodón de manera sostenida durante dos años con aguas sódicas se concluyó que aunque los suelos al final de los experimentos adquirieron diferentes niveles de sodio intercambiable; los distintos cultivares de algodón presentaron distintos niveles de tolerancia a la salinidad y a la sodicidad.

En otros experimentos que condujeron Manchada *et al.*, 1985<sup>89</sup> con aguas sódicas, aplicadas a suelos y con trigo como cultivo, y con los siguientes valores de salinidad y sodicidad: CE=4.0 mS cm<sup>-1</sup>, RAS=26 y CSR=15, con aplicaciones de yeso para neutralizar 50 y 100% de la sodicidad se concluyó que en general, la producción de trigo no disminuye significativamente.

En aguas residuales por lo general se tienen considerables cantidades de iones bicarbonato debido a la actividad biológica que se presenta en estas aguas. En aguas ricas en iones bicarbonato, se tiene la tendencia de que iones de calcio y magnesio se precipitan en forma de carbonatos, a medida que la solución del suelo se hace más concentrada<sup>150</sup>. Esta reacción no se completa totalmente en circunstancias ordinarias, pero a medida que va teniendo lugar, las concentraciones de calcio y magnesio se van reduciendo, aumentando la proporción relativa de las concentraciones de iones de sodio. Este proceso aumenta los valores de la relación de adsorción de sodio RAS.

Eaton, 1950<sup>38</sup> utiliza tres términos para referirse a estas reacciones:

1. Porcentaje de sodio encontrado

$$\frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+} 100$$

2. Porcentaje de sodio posible

$$\frac{\text{Na}^+ 100}{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+) - (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)}$$

3. Carbonato de sodio residual Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

$$(\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

Los constituyentes iónicos en estas relaciones se expresan en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>.



Para establecer con que intensidad se adsorbe el ion sodio en aguas de riego, que tienen diferentes cantidades de carbonato de sodio residual; Wilcox *et al.*, 1954<sup>155</sup> diseñaron un experimento que incluyó el crecimiento del pasto Rhodes en macetas de suelo franco Hanford (Cuadro 16). Las propiedades físico-químicas en los suelos se determinaron después de los 42 y 86 riegos. Con base en datos que obtuvieron y utilizando el término “carbonato de sodio residual”, establecieron algunos umbrales de contenidos de carbonatos y de bicarbonatos en las aguas de riego (Cuadro 15).

El carbonato de sodio residual se calcula de acuerdo con la siguiente relación:

$$CSR = (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

Donde: Los iones están expresados en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ .

Cuadro 15. Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con el carbonato de sodio residual.

Clase	Carbonato de Sodio Residual ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ )
Buena	<1.25
Condicionada	1.25 a 2.5
No recomendable	>2.5

Fuente: Wilcox *et al.*, 1954

Después de los trabajos de Eaton, 1950<sup>38</sup> y Wilcox *et al.*, 1954<sup>155</sup> se han utilizado para riego aguas de pozos profundos y aguas residuales con valores de carbonato de sodio residual más altos que los que propuso en un tiempo Eaton. Esto es debido a que en la actualidad, prácticamente se ha utilizado en el riego de cultivos, todo tipo de aguas de las más variada composición química.

Las aguas que contienen  $CSR > 2.5 \text{ mmol}_c \text{L}^{-1}$  han sido consideradas como insatisfactorias para riego, sin embargo, Gupta, 1983<sup>52</sup>, reportó que las aguas de riego que contienen  $CSR > 10 \text{ mmol}_c \text{L}^{-1}$ , y una conductividad eléctrica de  $2 \text{ mS cm}^{-1}$  y un  $RAS < 10$ , puede prácticamente usarse sin afectar el rendimiento del trigo en un suelo franco-arenoso calcáreo.

Cuadro 16. Composición química de aguas para riego que se experimentaron en un suelo franco Hanford con diferentes números de riegos.

Aguas de riego							Análisis de las muestras de suelo después del riego							
No.	Concentración mmolc L <sup>-1</sup>	Composición				CSR <sup>*</sup> mmolc L <sup>-1</sup>	Riego 42				Riego 86			
		Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> %	Cl <sup>-</sup>		CE dSm <sup>-1</sup>	pH	SI mmol 100 g <sup>-1</sup>	PSI	CE dS m <sup>-1</sup>	pH	SI mmol 100 g <sup>-1</sup>	PSI
20 <sup>a</sup>	20.0	25.0	75.0	0.0	100.0	0.0	3.73	6.8	1.16	12.0	5.30	6.8	1.40	16.0
20 <sup>b</sup>	20.0	25.0	75.0	50.0	50.0	5.0	5.94	8.6	4.52	52.0	16.00	9.4	6.45	72.0
10 <sup>a</sup>	10.0	25.0	75.0	0.0	100.0	0.0	2.22	7.2	0.80	8.4	3.70	7.3	1.40	15.0
10 <sup>b</sup>	10.0	25.0	75.0	50.0	50.0	2.5	2.03	8.6	1.72	20.0	7.30	9.0	3.80	42.0
5 <sup>a</sup>	5.0	25.0	75.0	0.0	100.0	0.0	1.28	6.8	0.84	9.0	1.78	6.7	1.12	11.0
5 <sup>b</sup>	5.0	25.0	75.0	50.0	50.0	1.25	1.18	8.4	1.02	10.0	2.42	7.7	1.98	20.0
1 <sup>a</sup>	1.0	25.0	75.0	0.0	100.0	0.0	0.40	7.1	0.22	2.4	0.32	6.4	0.25	2.4
1 <sup>b</sup>	1.0	25.0	75.0	50.0	50.0	0.25	0.36	7.0	0.24	2.6	0.34	6.4	0.22	2.1
5aL	5.0	75.0	25.0	0.0	100.0	0.0	1.02	6.9	0.22	2.2	1.50	6.1	0.23	2.2
5bL	5.0	75.0	25.0	85.0	15.0	0.50	0.69	8.1	0.29	3.1	1.05	7.4	0.36	3.5
1aL	1.0	75.0	25.0	0.0	100.0	0.0	0.34	7.0	0.14	1.5	0.36	6.4	0.12	1.1
1bL	1.0	75.0	25.0	85.0	15.0	0.10	0.33	7.2	0.14	1.4	0.34	6.4	0.13	1.3

Fuente: Wilcox *et al.*, 1954

\*CSR=CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> + HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> - (Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup>)

En experimentos sobre riego continuo con aguas sódicas y aguas salino-sódicas para estudiar cómo cambian las propiedades físico-químicas de los suelos con rotaciones de algodón-trigo Bajwa *et al.*, 1992<sup>15</sup> estableció que considerando 10% de disminución de cosechas, se puede considerar como límite un valor de 6 mmolc L<sup>-1</sup> de carbonato de sodio residual, y cuando se pueden permitir disminuciones de rendimientos de 25%, en estos casos, se pueden utilizar aguas con 10 mmolc L<sup>-1</sup> de carbonato de sodio residual.

En Pakistán y en la India, se tienen muchas fuentes de agua de riego del tipo sódico, han llevado a cabo bastantes investigaciones sobre el desarrollo y crecimiento de diferentes cultivos en suelos regados con aguas que tienen distintos valores de CSR, sobre todo en la India<sup>12,13,16,26,27,28,36,47,56,87,88,89,90,105,118,133,136,137,138</sup>, se investiga el efecto del riego con aguas sódicas sobre cultivos y suelos con contenidos de carbonato de sodio residual de 2 mmolc L<sup>-1</sup> en aguas de pozos y aguas experimentales con 4, 8, 12 y 16 mmolc L<sup>-1</sup> de carbonato de sodio residual<sup>112</sup>

Para establecer, con que intensidad se adsorbe el ion sodio de aguas salino-sódicas en suelos y utilizando una rotación de cultivos algodón-trigo, se estudiaron las siguientes aguas por Bajwa *et al.*, 1992<sup>15</sup> en el Noroeste de la India, en la Universidad Agrícola de Ludhiana, Punjab, India (Cuadro 17).

Cuadro 17. Composición química de aguas de riego.

Características	Agua de canal	Agua salina 1	Agua salina 2	Agua salina 3	Agua salina 4	Agua salina 5	Agua salina 6	Agua salina 7
CE (ds m <sup>-1</sup> )	0.25	0.56	0.92	1.16	2.85	2.76	2.83	2.69
Iones solubles (mmolc L <sup>-1</sup> )								
Ca <sup>2+</sup>	1.30	1.25	1.20	1.10	1.35	1.20	1.25	1.05
Mg <sup>2+</sup>	2.55	2.55	2.75	2.80	2.80	2.75	2.95	2.70
Na <sup>+</sup>	0.50	3.70	7.30	12.00	23.90	23.90	26.10	26.10
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> +HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2.00	6.00	9.80	13.40	3.00	6.20	10.20	13.80
Cl <sup>-</sup>	0.40	0.40	0.50	0.40	22.60	19.60	17.60	14.40
pH <sub>c</sub> <sup>a</sup>	7.73	7.33	7.03	6.89	7.55	7.20	7.03	6.93
CSR <sup>b</sup>	0.00	3.45	7.05	10.60	0.20	3.45	7.25	11.10
RAS <sub>or</sub> <sup>c</sup>	0.40	3.30	6.20	10.10	20.20	20.40	21.50	22.40
RAS <sub>aj</sub> <sup>d</sup>	0.70	6.80	14.80	25.50	37.40	44.90	50.90	55.50
RAS <sup>oe</sup>	0.40	3.70	7.20	11.70	20.10	22.20	24.40	25.50

Fuente: Bajwa *et al.*, 1992

<sup>a</sup> pH<sub>c</sub> = (pk'<sub>2</sub>-pk'<sub>c</sub>)+p(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>)+p(Alk) donde pk'<sub>2</sub> y pk'<sub>c</sub> son los logaritmos negativos de la segunda constante de disociación del HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y la constante de solubilidad del CaCO<sub>3</sub> respectivamente, ambos corregidos por la fuerza iónica, p(Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>) y p(Alk) son los logaritmos negativos de la concentración molar de (Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>) y la concentración equivalente de las bases titulables de (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>+ HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), respectivamente.

<sup>b</sup> CSR = (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>+HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) - (Ca<sup>2+</sup>+ Mg<sup>2+</sup>). Las concentraciones de los cationes y de los aniones están expresadas en mmolc L<sup>-1</sup>.

<sup>c</sup> RAS<sub>or</sub>, <sup>d</sup> RAS<sub>aj</sub> y <sup>e</sup> RAS<sup>o</sup>. Los cationes están expresados en mmolc L<sup>-1</sup> - Ca<sup>o</sup> es la concentración de calcio de la solución del suelo cerca de la superficie, modificada de acuerdo a la conductividad eléctrica del agua de riego, y su relación HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/Ca<sup>2+</sup> y una presión estimada de CO<sub>2</sub> de 0.0007 atm en la superficie del suelo.

Los valores observados del por ciento de sodio intercambiable PSI en suelos después de haberse aplicado aguas de riego AC, AS<sub>1</sub>, AS<sub>2</sub>, AS<sub>3</sub>, AS<sub>4</sub>, AS<sub>5</sub>, AS<sub>6</sub> y AS<sub>7</sub>, se presentan en el Cuadro 18.

Cuadro 18. Porcentaje de sodio intercambiable en suelos con rotación de cultivo algodón-trigo y en donde se aplicaron las siguientes aguas de riego AC, AS<sub>1</sub>, AS<sub>2</sub>, AS<sub>3</sub>, AS<sub>4</sub>, AS<sub>5</sub>, AS<sub>6</sub> y AS<sub>7</sub>.

TRATAMIENTOS	CSR	PSI OBSERVADO
Agua de canal	0.00	1.90
AS <sub>1</sub> sódica	3.45	5.60
AS <sub>2</sub> sódica	7.05	10.00
AS <sub>3</sub> sódica	10.60	24.40
AS <sub>4</sub> salina-sódica	0.20	21.00
AS <sub>5</sub> salina-sódica	3.45	28.00
AS <sub>6</sub> salina-sódica	7.25	38.80
AS <sub>7</sub> salina-sódica	11.10	44.30

Fuente: Bajwa *et al.*, 1992

Choudhary *et al.*, 2006<sup>29</sup>, con el objetivo de evaluar el efecto de alternar el riego con aguas sódicas y no sódicas en el rendimiento de girasol (*Helianthus annuus* L.) durante seis años estudiaron las siguientes aguas en la Universidad Agrícola de Ludhiana, Punjab, India. (Cuadro 19).

Cuadro 19. Composición química de aguas de riego.

Características	Agua de canal	Agua sódica
CE (ds m <sup>-1</sup> )	0.29	1.40
Iones solubles (mmolc L <sup>-1</sup> )		
Ca <sup>2+</sup>	1.50	0.60
Mg <sup>2+</sup>	0.90	0.80
Na <sup>+</sup>	0.40	12.50
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> +HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1.80	11.50
Cl <sup>-</sup>	1.40	1.60
CSR <sup>a</sup>	-	10.10
RAS <sup>b</sup>	0.37	14.90

Fuente: Choudhary *et al.*, 2006

<sup>a</sup>. CSR=CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> + HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> - (Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup>). Los iones están expresados en mmolc L<sup>-1</sup>

<sup>b</sup>. RAS. Los iones están expresados en mmolc L<sup>-1</sup>

El uso de aguas sódicas durante seis años (Cuadro 20), incrementó el pH y PSI del suelo, disminuyendo significativamente la infiltración de suelos y el rendimiento de cultivos de girasol (*Helianthus annuus* L.).

Cuadro 20. Porcentaje de sodio intercambiable en suelos donde se alterno el riego con aguas sódicas y aguas de canal en cultivos de girasol (*Helianthus annuus* L.) durante seis años.

TRATAMIENTOS	PSI OBSERVADO			RENDIMIENTO kg ha <sup>-1</sup>
	0.00-0.15 m	0.15-0.30 m	0.30 – 0.60 m	
Agua de canal	5.50	5.54	5.97	100
Agua sódica	41.50	41.80	37.50	78
2 Agua de canal-Agua sódica <sup>a</sup>	8.47	10.40	11.00	91
Agua de canal-Agua sódica	10.10	12.50	24.90	88
Agua de canal- 2 Agua sódica	16.90	21.50	30.70	81
Agua Sódica-2 Agua de canal	25.20	18.80	26.40	92
Agua sódica-Agua de canal	23.10	29.40	24.10	85
2 Agua sódica-Agua de canal	26.20	28.80	33.20	82

Fuente: Choudhary *et al.*, 2006

<sup>a</sup>. Dos ciclos de riego usando agua de canal y uno de agua sódica

Prasad *et al.*, 2001<sup>112</sup> establecieron experimentos con aguas de riego de diferentes cantidades de carbonato de sodio residual, con la finalidad de conocer con que intensidad se adsorbe el sodio intercambiable en los suelos (Cuadro 21). Los cultivos que se estudiaron fueron Palmarosa (*Cymbopogon martínni*) y Lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*).

Cuadro 21. Composición química de aguas de riego.

Fuente	CSR	CE	RAS	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> +HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	dS m <sup>-1</sup>	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>					
Agua de pozo (control)	2.00	0.70	1.30	2.20	2.00	2.80	6.80	1.20	0.30
Agua sódica <sub>1</sub>	4.00	3.40	13.80	25.50	4.00	2.80	10.80	18.70	4.30
Agua sódica <sub>2</sub>	8.00	3.40	13.80	25.50	4.00	2.80	14.80	15.70	3.30
Agua sódica <sub>3</sub>	12.00	3.00	13.80	25.20	4.00	2.80	18.80	12.20	2.80
Agua sódica <sub>4</sub>	16.00	2.90	13.80	25.20	4.00	2.80	22.80	9.20	1.80

Fuente: Prasad *et al.*, 2001

Después de haberse aplicado aguas sódicas en cultivos de Palmarosa (*Cymbopogon martínni*) y Lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*). En los Cuadros 22 y 23 se presentan los valores de las diferentes propiedades físico-químicas en los suelos.

Cuadro 22. Sodificación de los suelos debido a los efectos de aguas sódicas con diferentes cantidades de carbonato de sodio residual. Cultivo Palmarosa (*Cymbopogon martínni*).

Fuente	Nivel de CSR	Profundidad de suelos	Después de 12 meses del trasplante (Julio 1994)			Al final del experimento (Agosto 1995)		
			pH <sub>1:2.5</sub>	CE <sub>e</sub>	RAS <sub>e</sub>	pH <sub>1:2.5</sub>	CE <sub>e</sub>	RAS <sub>e</sub>
				dS m <sup>-1</sup>	(mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) <sup>1/2</sup>		dS m <sup>-1</sup>	(mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) <sup>1/2</sup>
Agua de pozo (control)	2.00	1	8.30	0.46	1.00	8.90	0.81	3.70
		2	8.90	0.50	3.21	8.90	1.36	7.29
Agua sódica <sub>1</sub>	4.00	1	8.50	0.51	6.46	9.10	2.37	16.25
		2	9.00	0.65	7.20	9.20	3.61	19.27
Agua sódica <sub>2</sub>	8.00	1	9.10	0.67	8.34	9.10	3.58	21.92
		2	9.30	0.80	9.95	9.30	5.38	24.68
Agua sódica <sub>3</sub>	12.00	1	9.10	0.70	8.44	9.40	3.16	25.97
		2	9.50	0.78	11.86	9.50	3.90	32.15
Agua sódica <sub>4</sub>	16.00	1	9.40	0.85	12.89	9.60	2.16	28.52
		2	9.50	0.87	13.10	9.80	3.90	34.57

Fuente: Prasad *et al.*, 2001

<sup>a</sup> Profundidad del suelo (1) 0-15 cm, (2) 15-30 cm.

Los resultados de estas investigaciones sugieren, que la caída de rendimientos de la rotación algodón-trigo y de los cultivos palmarosa y lemongrass, disminuyen a medida que aumenta la conductividad eléctrica o aumenta el RAS de la solución del suelo, debido a la aplicación de aguas sódicas con diferentes cantidades de carbonato de sodio residual.

También se observó en estos experimentos, que el mayor efecto en la disminución de rendimientos, debido a aumentos del carbonato de sodio residual, fue debido a efectos del ion específico; como por ejemplo, el ion sodio induce una deficiencia del ion calcio, o como consecuencia de una mayor concentración del ion sodio en las soluciones de suelos. Este ion tiene efectos tóxicos. Estos fenómenos se presentan de manera conjunta.

Cuadro 23. Sodificación de los suelos debido a los efectos de aguas sódicas con diferentes cantidades de carbonato de sodio residual. Cultivo Lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*).

Fuente	Nivel de CSR mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	Profundidad de suelos cm <sup>a</sup>	Después de 12 meses del trasplante (Julio 1994)			Al final del experimento (Mayo 1995)		
			pH <sub>1:2.5</sub>	CE <sub>e</sub> dS m <sup>-1</sup>	RAS <sub>e</sub> (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) <sup>1/2</sup>	pH <sub>1:2.5</sub>	CE <sub>e</sub> dS m <sup>-1</sup>	RAS <sub>e</sub> (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) <sup>1/2</sup>
			Agua de pozo (control)	2.00	1	8.20	0.36	1.09
		2	8.30	0.41	1.63	8.60	1.96	5.27
Agua sódica <sub>1</sub>	4.00	1	8.90	0.45	5.45	9.00	3.04	18.78
		2	9.10	0.62	7.53	8.80	2.86	14.97
Agua sódica <sub>2</sub>	8.00	1	9.00	0.55	7.11	9.30	3.95	19.26
		2	9.10	0.67	8.14	9.10	3.88	17.78
Agua sódica <sub>3</sub>	12.00	1	9.00	0.74	7.52	9.50	6.08	35.31
		2	9.30	0.75	8.59	9.30	3.94	19.01
Agua sódica <sub>4</sub>	16.00	1	9.30	0.83	9.67	9.70	10.07	58.67
		2	9.40	0.90	11.01	9.40	4.36	22.15

Fuente: Prasad *et al.*, 2001

<sup>a</sup> Profundidad del suelo (1) 0-15 cm, (2) 15-30 cm.

Para visualizar como varían los valores del carbonato de sodio residual en aguas residuales urbano-industriales que riegan el Valle del Mezquital que provienen de la ciudad de México, también se determinó en estas aguas este parámetro.

### 4.7.3 Criterios de toxicidad

Los problemas de toxicidad surgen cuando ciertos elementos (iones) del suelo o del agua, son absorbidos por las plantas y acumulados en sus tejidos, en concentraciones lo suficientemente altas como para provocar daños y reducir sus rendimientos. La magnitud de estos daños depende de la cantidad de iones absorbidos y de la sensibilidad de las plantas<sup>95</sup>. Los iones que con más frecuencia ocasionan toxicidad son sodio, cloro y boro<sup>108,153</sup>. Los problemas de toxicidad pueden ocurrir aun cuando estos iones se encuentren en concentraciones bastante bajas. Sin embargo, los problemas de toxicidad a menudo complican y complementan los problemas de salinidad y de infiltración.

#### Sodio

Las plantas absorben sodio del suelo junto con el agua. A medida que el agua es transpirada el  $\text{Na}^+$  se va concentrando en las hojas y cuando alcanza ciertas concentraciones produce efectos tóxicos. El límite de tolerancia de cada cultivo es distinto, pero para muchas especies arbóreas la toxicidad se presenta cuando el  $\text{Na}^+$  presenta un porcentaje superior al 0.25-0.5% respecto al peso seco de la hoja. El efecto tóxico del sodio no depende de la concentración absoluta de este catión en el suelo, sino de su proporción respecto al calcio. Por tal razón la tolerancia de cultivos se relaciona con el PSI del suelo<sup>109</sup>.

#### Cloro

El cloro no es adsorbido por el complejo de cambio, pero se encuentra disuelto en la solución del suelo, de donde puede ser absorbido por las raíces y conducido a las hojas, donde se puede acumular hasta niveles perjudiciales. Estos son generalmente de 0.3 a 0.5% respecto a la hoja en peso seco<sup>109</sup>. La acumulación del ión cloruro en los tejidos de plantas que manifiestan síntomas de toxicidad, no es una indicación infalible de la toxicidad específica del cloruro<sup>126</sup>. Muchas especies de plantas no son más sensibles a cloruros que a concentraciones isosmóticas de sulfatos.

## Boro

El boro un elemento esencial y potencialmente tóxico para las plantas cuando excede apenas ligeramente el nivel óptimo, se encuentra en casi todas las aguas naturales y es uno de los más tóxicos constituyentes de la irrigación del agua, su concentración varía desde trazas hasta varias partes por millón<sup>53,73,140,141,153</sup>.

La toxicidad del boro se presenta en concentraciones arriba de pocos mg L<sup>-1</sup> para la mayoría de las plantas<sup>43,52,53,95,100,125,130,137,140,153</sup>. Las plantas pueden crecer normalmente en cultivos de arena con trazas de boro (0.03-0.04 mg L<sup>-1</sup>) y se presenta toxicidad cuando la concentración llega a 1 mg L<sup>-1</sup> de boro<sup>125,126</sup> y es suficiente para ocasionar sensibilidad a plantas de limón y naranjo, en tanto que la alfalfa logra desarrollo máximo si el agua de riego posee de 1-2 mg L<sup>-1</sup> de boro<sup>72</sup>.

Las aguas superficiales naturales rara vez contienen niveles tóxicos de boro, pero las aguas de manantiales y aguas de pozos pueden contener concentraciones tóxicas, principalmente en las cercanía de fallas tectónicas y en las zonas geotérmicas. La toxicidad del boro ocurre con mayor frecuencia en los suelos de regiones áridas y semiáridas, donde son irrigados con altas concentraciones de boro, mientras que las deficiencias de boro son encontradas principalmente en regiones húmedas<sup>73</sup>. En los rangos de toxicidad para las plantas, el boro debe estar en la solución del suelo más que aquel boro que se encuentra adsorbido en las partículas del suelo<sup>95,113</sup>.

Si el boro es esencial para el desarrollo y crecimiento de las plantas, el sodio por lo contrario no es esencial, aunque sin embargo, se requieren cantidades muy pequeñas de sodio, mientras que, el cloro es esencial en cantidades tan pequeñas que a menudo es clasificado como no esencial para algunos cultivos. Por ejemplo, si el nivel esencial del boro en el agua es de 0.2 mg L<sup>-1</sup>; las concentraciones de boro entre 1 y 2 mg L<sup>-1</sup> son tóxicas<sup>85</sup>.



La clasificación de las aguas residuales con base en el contenido de boro<sup>3</sup> se presenta en el Cuadro 24.

Cuadro 24. Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con el contenido de boro.

<b>Clase</b>	<b>Contenido de Boro (mg L<sup>-1</sup>)</b>
Buena	<0.3
Condicionada	0.3 a 4
No recomendable	>4

Fuente: Aceves y Palacios, 1970

## **Fosfatos**

El fósforo puede existir en aguas en solución o suspensión, en estado mineral y orgánico y bajo forma de diferentes compuestos. La interacción del fósforo con la salinidad es altamente dependiente de la especie y etapa de desarrollo de la planta, concentración y tipo de salinidad así como de la concentración de P en el sustrato<sup>48,106</sup>.

En las directrices para interpretar la calidad de las aguas para riego. Ayers y Wescot, 1987<sup>14</sup>, señalan que el contenido de fósforo en aguas de riego normalmente es de 0-2 mg L<sup>-1</sup>

## **Sulfatos**

Junto con cloruros, los sulfatos son los principales aniones presentes en las muestras de agua y son aportes importantes en suelos salinos, pero su control se efectúa adecuadamente considerando volúmenes extra de agua en riegos para asegurar su salida fuera de la zona radicular.

Las plantas pueden presentar sensibilidad a concentraciones altas de sulfatos ya que puede limitar la absorción de sodio y alterar el balance catiónico óptimo dentro la planta, tal sensibilidad se encuentra relacionada con la tendencia de las altas concentraciones de sulfatos a limitar la absorción de calcio por las plantas.

Juntamente con la disminución de calcio, se encuentran asociados los aumentos en la absorción de sodio y potasio, de tal manera que los efectos de la alta concentración de sulfatos en el sustrato pueden estar relacionados a una alteración del balance catiónico óptimo dentro de la planta<sup>126</sup>.

## **Nitratos**

El nitrógeno contenido en el agua de riego se encuentra disponible para las plantas y, por lo tanto, debe considerarse como parte integral del nitrógeno total requerido por los cultivos y del programa de fertilización.

Por otro lado, el agua de riego puede contener niveles excesivos de nitrógeno para ciertos cultivos sensibles, los cuales en este caso presentarían un mayor crecimiento vegetativo que provocaría un retraso en la maduración y baja calidad del producto<sup>14</sup>.

## **Elementos pesados**

Un número de elementos se encuentran normalmente en bajas concentraciones en el agua de riego. Aunque no se incluyen en las rutinas regulares de análisis de aguas de riego, son muy importantes cuando se usan efluentes de agua provenientes de las descargas de uso industrial para el riego agrícola<sup>108</sup>.

Entre ellos se incluyen el Aluminio (Al), Berilio (Be), Cobalto (Co), Flúor (F), Hierro (Fe), Litio (Li), Manganeseo (Mn), Molibdeno (Mo), Selenio (Se), Estaño (Sn), Titanio (Ti), Tungsteno (W) y Vanadio (V). Sin embargo, existe un grupo de elementos pesados que ocasionan peligrosos daños a la salud cuando son absorbidos por las plantas, entre ellos se encuentran Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Mercurio (Hg) y Zinc (Zn).

## **4.8 Descripción de la zona geográfica de estudio**

### **4.8.1 Área geográfica**

El Valle del Mezquital se riega con aguas residuales que proceden de la zona urbana del Valle de México, geográficamente<sup>59</sup> se encuentra en los siguientes municipios del estado de Hidalgo: Actopan, Ajacuba, Alfajayucan, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Cardonal, Chapantongo, Chilcuautla, Francisco I Madero, Ixmiquilpan, Mixquiahuala, Progreso, San Salvador, Santiago Anaya, Tasquillo, Tepeji de Ocampo, Villa de Tezontepec, Tlahuelilpan, Tlaxcoapan, Tula de Allende y Zimapán<sup>32</sup>. La superficie del Valle del Mezquital se estima en 4610 km<sup>2</sup>.

### **4.8.2 Clima**

Se distinguen tres zonas climáticas bien definidas en el estado de Hidalgo:

- a. Zona de climas cálidos y semicálidos de la Huasteca Hidalguense.
- b. Zona de climas templados de la Sierra Madre Oriental y Faja Volcánica Transmexicana.
- c. Zona de climas secos y semisecos de la Sierra Madre Oriental y Faja Volcánica Transmexicana.

Los climas templados se distribuyen en centro y sur de la entidad, con variantes de precipitación y temperatura, debidas principalmente a diferencias en altitud entre los llanos, valles y serranías que conforman a la Sierra Madre Oriental y la Faja Volcánica Transmexicana.

Los climas secos y semisecos se alternan con los climas templados, concentrándose en el oeste sobre llanuras y lomeríos. Aunque estas zonas se encuentran menos expuestas a la acción de los vientos húmedos, a las que están en contraste con climas subhúmedos están menos restringidas en cuanto a humedad.

## **Climas templados de la Sierra Madre Oriental y Faja Volcánica Transmexicana**

La diferencia de este clima estriba en la cantidad de humedad y su concentración de lluvias. Está asociado con comunidades de pino-encino en las partes altas y con vegetación de chaparral en las bajas.

### **Clima templado subhúmedo con lluvias en verano**

El centro del estado de Hidalgo abarca parte del municipio de Zimapán, y las llanuras de Alfajayucan. La temperatura media anual es de 14.5°C, con una máxima de 21.2°C en mayo y mínima en diciembre con 8.3°C. Su precipitación anual es de 610.8 mm, con máxima en julio (104.7 mm) y mínima en diciembre (7.2 mm).

## **Climas secos y semisecos de la Sierra Madre Oriental y Faja Volcánica Transmexicana**

Este grupo climático tiene tres variantes que se diferencian por el régimen térmico y el grado de humedad. Se concentran entre Ajacuba y Tecozautla.

### **Clima semiseco semicálido**

Se distribuye en parte de los municipios de Tecozautla, Tasquillo, Zimapán, cerca del río Moctezuma. Presenta lluvias de verano con invierno fresco. Su temperatura media anual es de 24.4°C con máxima en abril de 25.3°C y mínima en diciembre de 11.5°C. La precipitación anual es de 503.2 mm, con máxima en septiembre (142.8 mm) y mínima en febrero (4.3 mm).

### **Clima semiseco templado con lluvias en verano**

Abarca casi toda la región conocida como “El Valle Mezquital”. La temperatura media anual es de 14.8°C, con máxima en mayo de 17.3°C y mínima en noviembre de 9.4°C. La precipitación anual es de 543.4 mm; con máxima incidencia en septiembre (117.4 mm) y mínima en enero (8.8 mm).

## **Clima seco semicálido con lluvias en verano**

Se manifiesta en los alrededores de Ixmiquilpan, donde cruza el río Tula y en parte de los municipios de Eloxochitlán y Mezquitlán, en la laguna del mismo nombre. Su temperatura media anual es de 18.5°C, cuya máxima es en junio con 24.7°C y mínima en enero con 8.3°C; la precipitación anual es de 364.6 mm, con máxima en junio de 66.3 mm y mínima en febrero de 3.3 mm.

### **4.8.3 Geología**

La provincia geológica de la Faja Volcánica Transmexicana cubre también una gran porción del estado de Hidalgo, sobre todo en el sur y está constituida por rocas volcánicas Terciarias y Cuaternarias (brechas, tobas y derrames riolíticos intermedios y basálticos), de composición y textura variadas, las cuales presentan un extenso y grueso paquete que en localidades como Pachuca alcanza varios miles de metros de espesor. Éste estrato ha sido superpuesto a las rocas sedimentarias mesozoicas por los fenómenos del vulcanismo. De estas últimas se encuentran algunos afloramientos que sobresalen en forma de cerros aislados en medio del dominio de rocas ígneas, como en localidades de Tula de Allende y Atotonilco de Tula, donde afloran cerros de caliza que tienen uso industrial<sup>59</sup>.

La morfología de esta provincia es variada, con diversos tipos de estructuras volcánicas bien conservadas, como son: conos cineríticos, volcanes compuestos, volcanes escudo y calderas, además de extensos flujos piroclásticos y derrames lávicos basálticos, que tienen forma de mesetas y planicies sobre las que se han originado algunos lagos debido al cierre de las cuencas. De este tipo de fenómenos quedan huellas en el lago de Tecocomulco. Los basaltos son una unidad ígnea extrusiva del Terciario Superior, constituida por coladas basálticas de olivino, piroxenos y andesitas.

Morfológicamente está representada por mesetas disectadas, y en ocasiones coronadas por conos cineríticos. Aflora en las localidades de La Salitrera, Atotonilco el Grande, Xochitlán, Mixquiahuala, así como en el cerro La Paila<sup>59</sup>.

#### **4.8.4 Hidrología**

En el estado de Hidalgo las corrientes hídricas son escasas, debido a dos factores, el clima y topografía. En las porciones norte y noreste, aunque los vientos húmedos del Golfo de México propician abundantes lluvias, lo abrupto de la Sierra Madre Oriental impide el aprovechamiento de los escurrimientos que descienden rápidamente a las zonas bajas, las cuales forman parte de los estados de San Luis Potosí, Veracruz y Puebla<sup>59</sup>.

#### **Aguas superficiales**

El estado de Hidalgo se encuentra comprendido casi en su totalidad dentro de la región hidrológica “Río Pánuco” (No. 26), con una superficie de 19 793.60 km<sup>2</sup>. Sólo una pequeña extensión de la porción oriental forma parte de la región No. 27 “Tuxpan-Nautla”, cuya área es de 1111.52 km<sup>2</sup>.

#### **Región hidrológica “Río Pánuco” (No 26)**

Corresponde a la vertiente del Golfo de México y está considerada como una de las más importantes del país, tanto por su superficie, que la ubica en cuarto lugar nacional, como por el volumen de sus escurrimientos que le otorgan el quinto lugar. Debido a su gran superficie, la entonces, Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos dividió esta región en dos: “Alto Pánuco” y “Bajo Pánuco”. El “Alto Pánuco” comprende las cuencas de los ríos Tula y San Juan del Río, que son afluentes del río Moctezuma; y las cuencas Meztlán y Amajac. El área del “Bajo Pánuco” comprende las cuencas de los ríos Extóraz, Bajo Amajac, Tempoal, Moctezuma, Tampaón y Pánuco. El estado de Hidalgo abarca parte de estas dos zonas, e incluye solamente la cuenca del “Río Moctezuma”.

## **Río Moctezuma (26D)**

Ocupa una superficie de 19 793.60 km<sup>2</sup> del estado de Hidalgo, y tiene como corriente principal el río Moctezuma que se origina en el Cerro La Bufa, Estado de México, a una altitud de 3800 m. En su inicio es denominado San Jerónimo. Los afluentes de esta corriente en territorio hidalguense son: el río Tizahuapan, que nace en la sierra de Pachuca; el Metztitlán, que se origina en Puebla y deposita sus aguas en la Laguna de Metztitlán con el nombre de río Tulancingo, para continuar posteriormente su curso hasta el Moctezuma, como río Amajac. El río Tula, generado en el Estado de México, inicia su recorrido con dirección norte hasta la población de Ixmiquilpan, de ahí cambia su curso hacia el noreste para después confluir con el río San Juan del Río, donde recibe el nombre de río Moctezuma y funciona como límite natural entre Querétaro e Hidalgo. Esta cuenca reviste gran importancia tanto por su extensa superficie y corrientes principales, como por los distritos de riego que se ubican en ella, de las cuales destaca el de Tula (DR03) que, después de los del norte de la República, es uno de los más importantes del país.

El distrito de Tula (DR03) está ubicado en la porción suroeste del estado y se abastece de los ríos San Luis, Tepeji, El Salto y Tula, así como de los volúmenes almacenados en las presas Taxhimay, del Estado de México, Requena y Endhó en Hidalgo. Además, una considerable cantidad de hectáreas son irrigadas por grandes volúmenes de aguas negras provenientes del Valle de México. Cabe señalar que existen grandes pérdidas de agua debido a las filtraciones por falta de revestimiento y cuidado de los canales.

### **4.8.5 Almacenamiento**

En esta cuenca, en general dentro del estado de Hidalgo, hay más de cien obras de almacenamiento entre bordos, aguadas, jagüeyes y otras de pequeña irrigación. Sin embargo, únicamente se señalan los más sobresalientes de acuerdo con los volúmenes almacenados<sup>59</sup>.

a) La Presa Taxhimay, ubicada en el Estado de México, se reporta en el inventario de recursos superficiales de Hidalgo porque un volumen importante de ella se aprovecha en el municipio de Tepeji de Ocampo.

b) La Presa Endhó, situada en el municipio de Tula, cuenta con una capacidad total de 183 M m<sup>3</sup>, que irrigan más de 42 000 hectáreas. En este almacenamiento se concentran las aguas negras del Distrito Federal, que generan problemas ambientales dentro de la zona además de los ocasionados por la presencia de grandes cantidades de lirio acuático, que no permiten la reaeración y provocan alta evaporación<sup>59</sup>.

Otras obras de importancia que se localizan en esta cuenca son las presas Requena, Javier Rojo Gómez y Vicente Aguirre, con capacidades mayores de 5 M m<sup>3</sup>, además de La Presa Debohdé.

El Valle del Mezquital, se empieza a regar con aguas residuales urbano-industriales provenientes de la Ciudad de México desde prácticamente 1898. A partir de 1900 cuando se abre el Gran Canal a través del túnel de Tequixquiac, Hidalgo; se aplica el riego con gran amplitud en grandes áreas del Valle del Mezquital. En la actualidad se riegan con aguas residuales 180 000 ha; pero cada vez con mayor frecuencia se abren nuevas áreas para riego en los valles intermontanos del Valle del Mezquital. Hoy día se riegan con aguas residuales urbano-industriales de la Ciudad de México, áreas agrícolas tan distantes como las áreas del Valle de Ajacuba, Hidalgo.

Actualmente se disponen de grandes volúmenes (aproximadamente 2000 M m<sup>3</sup> al año) de aguas residuales provenientes de la Ciudad de México y zonas conurbadas. La disposición de grandes volúmenes de agua residual en las diferentes zonas del Valle del Mezquital, ha conducido a que los agricultores del valle apliquen láminas de riego muy grandes, de aproximadamente 1 m anual<sup>132</sup>.



## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Ubicación de los sitios de muestreo

Las aguas residuales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México son enviadas al Valle del Mezquital a través de tres conductos: El Emisor Poniente, El Gran Canal de Desagüe y El Emisor Central.

Para conocer las dimensiones de las diferentes zonas del Valle del Mezquital que son regadas con estas aguas, se hicieron recorridos preliminares especiales y así poder delimitar la zona de muestreo de las aguas residuales que circulan por la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán.

Para el Muestreo 1, se establecieron 100 sitios de muestreo en el periodo de verano del 2005 (Figura 4) y para el Muestreo 2, se establecieron 106 sitios de muestreo en el periodo de primavera del 2006 (Figura 5). Para ubicar geográficamente estos sitios de muestreo en un plano cartográfico, se utilizó un GPS marca GARMIN MAP60. En cada sitio de muestreo se tomó una muestra de agua por duplicado de 0.5 L.

### 5.2 Determinaciones físico-químicas

Con el objetivo de establecer cómo varían las concentraciones totales iónicas en las aguas residuales, se determinaron los siguientes parámetros de calidad<sup>9,19,127</sup>: pH, CE, Ca<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, RSE, RSC, B, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, y Presión osmótica (Cuadro 25).

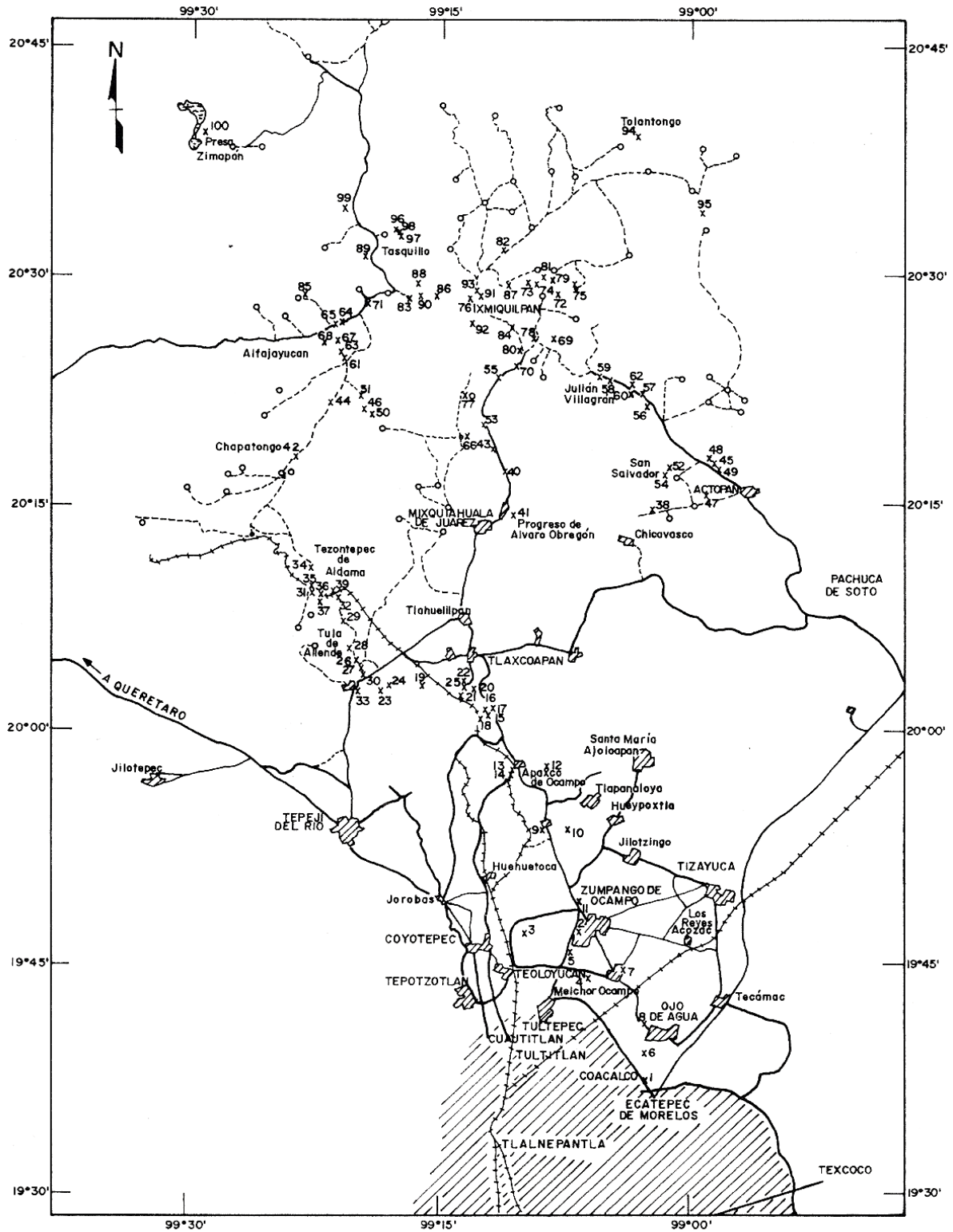


Figura 4. Localización geográfica de los sitios de muestreo de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapan, del Muestreo 1.

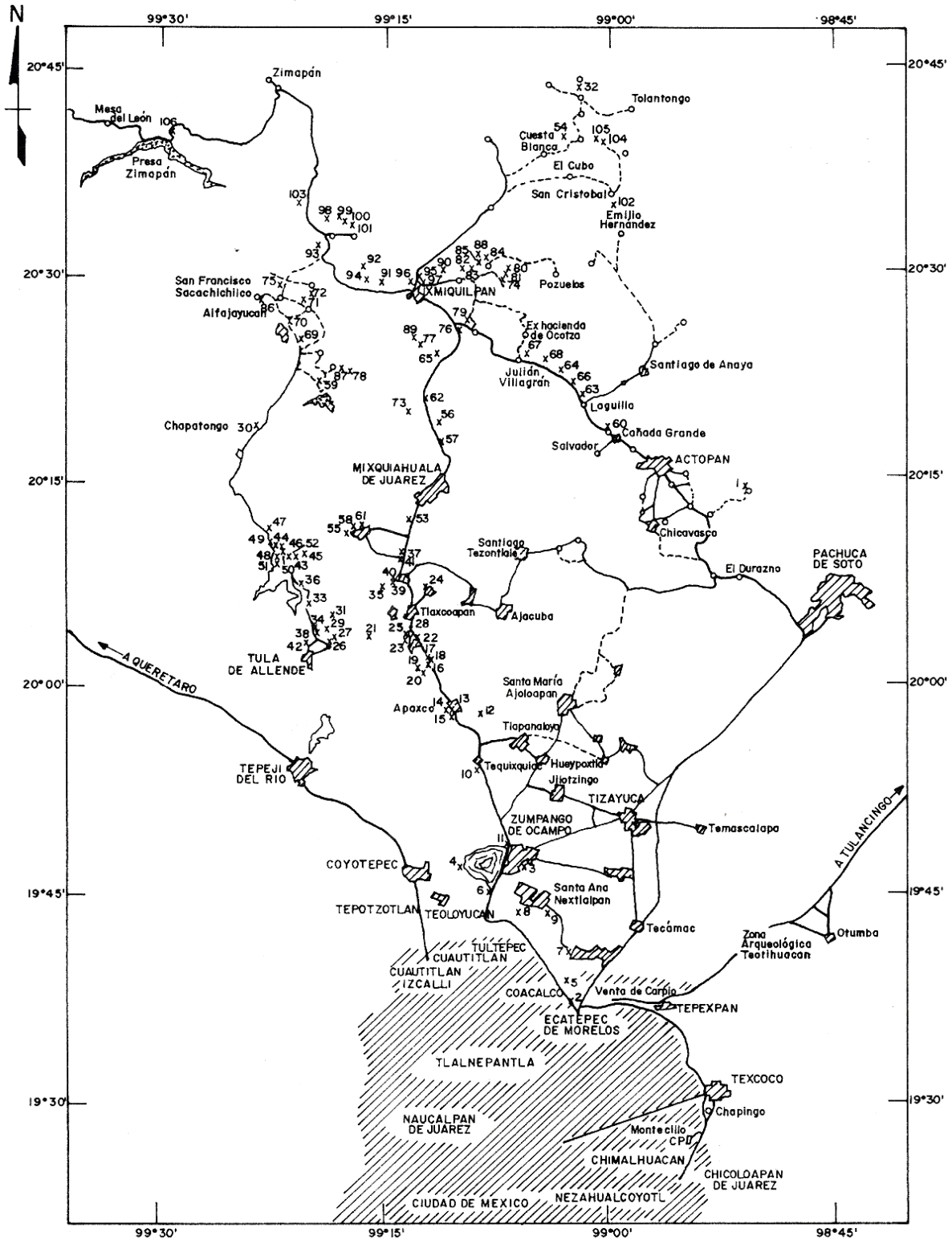


Figura 5. Localización geográfica de los sitios de muestreo de las aguas residuales, de la red hidrogáfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2.

Cuadro 25. Métodos analíticos utilizados para caracterizar las aguas residuales.

DETERMINACIÓN	MÉTODO	REFERENCIA
pH	Potenciómetro marca Beckman, modelo Hoffmann Pinther Bosworth	APHA, 1989 <sup>9</sup> . 4500-H+B
Conductividad eléctrica	Conductímetro puente de Wheastone con celdas de vidrio de rango 0.1 a 10 $\mu\text{S cm}^{-1}$	APHA, 1989 <sup>9</sup> . 25108
Residuo seco evaporado (RSE)	Gravimetría mediante estufa marca Hot-Plate modelo 2200 Thermolyne	APHA, 1989 <sup>9</sup> . 2540 D
Residuo seco evaporado (RSC)		
Carbonatos	Volumétrico. Mediante titulación con ácido sulfúrico 0.01N indicador Fenoftaleina	APHA, 1989 <sup>9</sup> . 2320 B
Bicarbonatos	Volumétrico. Mediante titulación con ácido sulfúrico 0.01N Indicador Anaranjado de Metilo	APHA, 1989 <sup>9</sup> . 2320 B
Cloruros	Método Mhor. Mediante titulación con nitrato de plata 0.01N, indicador Cromato de Potasio al 5%	APHA, 1989 <sup>9</sup> .4500-CI B
Calcio y Magnesio	Volumétrico. Mediante titulación con EDTA 0.01N Indicador Ericromo Negro T	APHA, 1989 <sup>9</sup> . 3500 Ca D
Calcio	Volumétrico. Titulación con EDTA 0.01N Indicador Murexida	APHA, 1989 <sup>9</sup> . 3500 Ca D
Sodio y Potasio	Flamometría. Flamómetro marca IL Autocal Flame Photometer 643, $\lambda=589$ nm, calibrado con soluciones estándar de 140 meq L <sup>-1</sup> para Na y de 5 meq L <sup>-1</sup> para K	APHA, 1989 <sup>9</sup> . 3500-Na y K, D
Sulfatos	Turbidimetría. Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35, $\lambda=420$ nm	APHA, 1989 <sup>9</sup> .4500-SO <sub>4</sub> E
Ortofosfatos	Espectrofotometría. Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35, $\lambda=690$ nm	Rodier, 1978 <sup>127</sup>
Boratos	Espectrofotometría. Espectrofotómetro modelo Perkin Elmer 35, $\lambda=690$ nm. Azomethine-H	Bingham, 1982 <sup>19</sup>
Presión osmótica	Osmometría. Osmómetro Wescor, modelo VAPRO 5520, calibrado con soluciones estándares de optimol de 100, 290 y 1000 mmol kg <sup>-1</sup>	

### **5.3 Directrices sobre la calidad del agua**

Las directrices para evaluar la calidad del agua de riego se presentan en el Cuadro 26. Las directrices se refieren sobre todo a los efectos a largo plazo de la calidad del agua sobre la producción de cultivos, las condiciones de suelo y el manejo agrícola. Las directrices tienen un carácter práctico y han sido utilizadas con éxito en la agricultura bajo riego, para evaluar los componentes del agua superficial, agua subterránea, agua de drenaje, efluentes de desagües y otras aguas residuales<sup>14</sup>.

Cuando se utilizan aguas con valores menores a los correspondientes a “ninguna” restricción, por lo general no se presentan o no se identifican problemas en los cultivos o en el suelo. En el caso de restricción “ligera o moderada” se requiere un cuidado gradualmente mayor en la selección de los cultivos y de las alternativas de manejo, para alcanzar el potencial máximo de rendimiento. La restricción “severa” implica la aparición de problemas de suelo y de cultivo y/o reducción en los rendimientos, y la necesidad de contar, para lograr rendimientos aceptables, con un manejo hábil y efectivo, además de un plan de operación específicamente adaptado a la calidad del agua que ha de emplearse.

Los límites son en cierto modo arbitrarios ya que en la realidad los cambios son graduales y no existe una división abrupta sobre las diferentes graduaciones. Una variación del 10-20%, por encima o por debajo de los datos, tiene poca importancia, si se considera juntamente y en relación con otros factores que puedan afectar los rendimientos.

Las directrices técnicas constituyen un primer paso para señalar las limitaciones, en calidad de una determinada fuente o suministro de agua. Además de ayudar a superar las limitaciones de uso de una agua determinada, también estas directrices nos permiten adaptarnos a un determinado manejo de suelos agrícolas, para un mejor uso de las aguas de baja calidad.

Cuadro 26. Lineamientos para evaluar la calidad del agua para riego.

Problema potencial	Unidades	Grado de restricción sobre el uso del agua		
		Ninguno	Ligero o Moderado	Severo
<b>Salinidad</b>				
(afecta disponibilidad de agua para el cultivo)				
CE	mS cm <sup>-1</sup>	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
TSS	mg L <sup>-1</sup>	< 450	450 – 2000	> 2000
<b>Infiltración</b>				
(reduce infiltración; evaluar usando a la vez la CE y el RAS)				
RAS = 0 - 3	y CE =	> 0.7	0.7 – 0.2	< 0.2
= 3 - 6	=	> 1.2	1.2 – 0.3	< 0.3
= 6 - 12	=	> 1.9	1.9 – 0.5	< 0.5
= 12 - 20	=	> 2.9	2.9 – 1.3	< 1.3
= 20 - 40	=	> 5.0	5.0 – 2.9	< 2.9
<b>Toxicidad de iones específicos</b>				
(afecta cultivos sensibles)				
<b>Sodio (Na<sup>+</sup>)</b>				
Riego por superficie	RAS	< 3.0	3.0 – 9.0	> 9.0
Riego por aspersión	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	< 3.0	> 3.0	
<b>Cloro (Cl<sup>-</sup>)</b>				
Riego por superficie	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	< 4.0	4 – 10.0	> 10.0
Riego por aspersión	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	< 3.0	> 3.0	
Boro B	mg L <sup>-1</sup>	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
<b>Oligoelementos</b>				
<b>Varios</b>				
(afecta cultivos sensibles)				
Nitrógeno (NO <sub>3</sub> -N)	mg L <sup>-1</sup>	< 5.0	5.0 – 30.0	> 30.0
Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )				
(aspersión foliar únicamente)	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	< 1.5	1.5 – 8.5	> 8.5
<b>pH</b>				
Amplitud normal 6.5 – 8.4				
*Cl/SO <sub>4</sub> >	Halofitismo			
	Suculencia			
*Cl/SO <sub>4</sub> <	Leñosidad			
	Xerofitismo			
*HCO <sub>3</sub> /Cl+SO <sub>4</sub> > Viscosidad de las paredes celulares en raíces				

Fuente: Ayers y Westcot, 1987  
 \*Velásquez, 2001

#### 5.4 Análisis estadístico

Para establecer la dependencia funcional entre la concentración total electrolítica ( $\text{mg L}^{-1}$ ), los  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  de cationes o de aniones y la presión osmótica (MPa) con respecto a la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) de las soluciones acuosas de las aguas residuales, se calibró un modelo lineal ajustado por el origen, mediante la técnica del análisis de regresión lineal el cual relaciona la concentración de las soluciones expresadas en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  o  $\text{mg L}^{-1}$  y la presión osmótica con respecto a la conductividad eléctrica de las soluciones acuosas<sup>126</sup>.

El modelo en forma general tiene la estructura siguiente:  $Y=B_1X$

Donde: Y representa la concentración de la solución en  $\text{mg L}^{-1}$  o ppm, en un primer caso; la concentración de la solución en  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  de cationes y aniones; en un segundo caso, y la presión osmótica en MPa desarrollada por la solución en un tercer caso;  $B_1$  es la pendiente de la recta, es decir, el número de unidades (ppm o  $\text{mg L}^{-1}$ ,  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  o atm) que aumenta la solución (Y) por cada unidad de conductividad eléctrica expresada en  $\mu\text{S cm}^{-1}$  o  $\text{dS m}^{-1}$  que aumenta la misma solución; X es la conductividad eléctrica de la solución en  $\text{mS cm}^{-1}$  ( $\text{CE} \times 10^3$ ) o  $\mu\text{S cm}^{-1}$  ( $\text{CE} \times 10^6$ ).

El ajuste del modelo se realizó al relacionar primero la conductividad eléctrica ( $\text{mS cm}^{-1}$  o  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) con la concentración de las soluciones (ppm o  $\text{mg L}^{-1}$ ), luego con la concentración ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ), y finalmente con la presión osmótica (MPa) empleando el método de mínimos cuadrados.

## 5.5 Formas de comprobar los análisis químicos de las aguas

Después de determinar los constituyentes principales, si éstos se expresan en equivalentes químicos (Eq), la suma de cationes y aniones deben ser aproximadamente iguales<sup>49</sup>.

### Balance de cationes y aniones

En principio, las soluciones acuosas son electroneutrales, es decir, en las soluciones se tiene una igualdad de cargas tanto positivas como negativas  $\Sigma n^+ = \Sigma n^-$ . El porcentaje de la diferencia absoluta entre la suma de cationes y aniones es el siguiente<sup>49</sup>:

$$\% \text{ Diferencia} = \frac{|\Sigma \text{cationes} - \Sigma \text{aniones}|}{\Sigma \text{cationes} + \Sigma \text{aniones}} 100$$

Y los criterios para aceptar este porcentaje son:

$\Sigma$ aniones (mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup> )	% Diferencia aceptable
0.0 – 3.0	± 0.2
3.0 – 10.0	± 2.0
10.0 – 800.0	± 2.0-5.0

### Sólidos totales disueltos medidos = Sólidos disueltos totales calculados

Para considerar que los análisis de las aguas son correctos, el rango de variación entre el valor de sólidos totales disueltos (STD) medidos mg L<sup>-1</sup> y los sólidos totales calculados, este rango debe estar entre los siguientes valores:

$$1.0 < \frac{\text{STD medidos}}{\text{STD calculados}} < 1.2$$

La concentración total de sólidos totales disueltos medidos debe ser mayor al calculado, porque una contribución significativa no puede ser incluida en el cálculo.



Si el valor medido es menor que el calculado, la suma mayor de iones y valores medidos no son confiables. Si el valor medido es mayor del 20% que el calculado, la suma menos de iones y sus constituyentes seleccionados deben ser analizados nuevamente<sup>49</sup>.

### **Conductividad eléctrica media = Conductividad eléctrica calculada**

En lo que se refiere a las mediciones de la conductividad eléctrica de las soluciones, y para considerar que estas mediciones son correctas el rango de variación de la conductividad eléctrica (CE) medida en mS cm<sup>-1</sup> y la conductividad eléctrica calculada debe estar entre los siguientes valores:

$$0.9 < \frac{CE \text{ medida}}{CE \text{ calculada}} < 1.1$$

### **Conductividad eléctrica medida y la suma de iones**

Para relacionar las mediciones de la conductividad eléctrica CE y la suma de iones (cationes o aniones), cualquiera de estas sumas será en términos generales CE/100 de los valores de la conductividad eléctrica expresada en μS cm<sup>-1</sup>. Para diferentes tipos de salinidad el valor se encuentra entre los siguientes rangos:

$$\frac{CE}{90} < \frac{CE}{100} < \frac{CE}{110}$$

o sea:  $100 \Sigma \text{aniones o } \Sigma \text{cationes en mmol}_c \text{ L}^{-1} = (0.9-1.1) CE$

Donde: Las concentraciones de cationes o aniones están expresadas en mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, y la conductividad eléctrica en μS cm<sup>-1</sup>.

La suma de aniones y cationes debe ser 1/100 del valor de la conductividad eléctrica medida.

## **Sólidos totales disueltos medidos a un rango de conductividad eléctrica**

Otra manera de considerar que los análisis químicos son correctos, es que, el valor numérico del cociente sólidos totales disueltos (ppm o mg L<sup>-1</sup>) dividido entre la conductividad eléctrica (mS cm<sup>-1</sup>) deberá ser aproximadamente 0.640. Para diferentes tipos de salinidad este valor tendrá variaciones entre 0.5-1.1.

Los valores calculados de mg L<sup>-1</sup>, mmolc L<sup>-1</sup> y presión osmótica de las aguas residuales urbano-industriales del sistema hidrográfico de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán son los que se obtuvieron mediante la inferencia estadística de los métodos de regresión lineal. Cuando se comparan procesos determinados experimentalmente con los procesos de ocurrencia teórica utilizando una ley fisicoquímica determinada<sup>126</sup>, el ángulo de la pendiente de esta relación debe ser aproximadamente 45°.

Para conocer las fracciones adsorbidas de sodio intercambiable en los sistemas coloidales de los suelos del Valle del Mezquital, en condiciones de equilibrio químico con aguas residuales que riegan estos suelos, se obtuvieron los valores de la relación de adsorción de sodio o RAS en sus diferentes conceptualizaciones físico-químicas.

A este respecto, para inferir sobre los valores de las fracciones adsorbidas de sodio en los suelos se utilizó la ecuación derivada de las reacciones reversibles de intercambio iónico de Gapon, 1987<sup>40</sup>, de acuerdo con la ley de acción de masas ya que el intercambio de cationes puede representarse mediante ecuaciones similares a las que se emplean en las reacciones químicas heterogéneas y estequiométricas<sup>40,41,44,151,152</sup>.

Dicha ecuación es la siguiente:

$$\text{PSI} = \frac{\text{kg RAS}}{1 + \text{kg RAS}} \cdot 100$$

Donde: PSI, es el porcentaje de sodio intercambiable en los sistemas coloidales de suelos;  $k_g$  es el coeficiente de selectividad iónica de las fracciones arcillosas y orgánico-minerales de los suelos [ $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ]<sup>-1/2</sup>; RAS, es la relación de adsorción de sodio de las aguas residuales. Aquí se consideraron los valores de RAS en las diferentes conceptualizaciones fisicoquímicas [ $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ]<sup>1/2</sup>.

A su vez, como las aguas residuales del sistema hidrográfico Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán son ricas en iones bicarbonato  $\text{HCO}_3^-$ , en esta investigación se calculó el parámetro de Eaton: Carbonato de sodio residual “ $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ” (CSR).

Por último, para caracterizar el comportamiento geoquímico de aguas residuales se determinaron las sales hipotéticas en las aguas residuales. Para establecer la formación sucesiva de tales sales hipotéticas, se tomaron en cuenta los valores de solubilidad de cada sal.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán se encuentra principalmente distribuida en el territorio del Valle del Mezquital, estado de Hidalgo, aunque también abarca un pequeño territorio del Estado de México. Conduce las aguas residuales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México hacia el Valle del Mezquital a través de tres conductos: El Emisor Poniente, El Gran Canal de Desagüe y El Emisor central.

- a. El Emisor Poniente, que desemboca en el Tajo de Nochistongo, es la salida más antigua y se construyó originalmente para desalojar las aguas del río Cuautitlán que producían inundaciones en épocas de lluvias, recibe aportaciones del Distrito Federal a través del Interceptor Poniente, descarga en el río El Salto, afluente del río Tula.
- b. El Gran Canal de Desagüe descarga a través de los túneles de Tequisquiac al río Salado, afluente del río Tula.
- c. El Emisor central descarga al río el Salto y a través del canal Salto-Tlamaco deriva aguas al Distrito de riego de Tula.

Los municipios del Estado de México en los cuales se riega con aguas residuales son: Santa María Tonanitla, Santa Ana Nextlalpan, Zumpango, Tequixquiac y Apaxco. En general, el Valle del Mezquital está conformado primordialmente por un conjunto de valles intermontanos que se encuentran ubicados en la parte suroeste del estado de Hidalgo.

De acuerdo con la distribución de los sitios de muestreo de las aguas residuales que son conducidas por la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, el objetivo de la toma de muestras de agua residual fue el de abarcar la mayor cantidad de superficie que se riega con aguas residuales que provienen del Valle de México.

## 6.1 Localización geográfica del área de estudio

La localización geográfica de los sitios de muestreo de las aguas residuales del Muestreo 1, se presentan en el Cuadro 27. Se incluye la ubicación altitudinal de los vasos de almacenamiento y de regulación que se encuentran distribuidos en el Valle del Mezquital, y son: a. La Laguna de Zumpango, cuya altitud es de 2250 m; b. La Presa Endhó, a 2008 m; c. La Presa Rojo Gómez, a 1965 m; d. La Presa Deboché, a 1810 m; e. La Presa Vicente Aguirre, a 1863 m; y f. La Presa Zimapán, a 1555 m.

La localización geográfica de los sitios de muestreo de las aguas residuales del Muestreo 2 se observa en el Cuadro 28, se presentan las altitudes de los sitios de muestreo del río Tula. El cauce superficial del río Tula conduce aguas residuales de riego y también recibe aguas que drenan a través de los suelos desde aguas de riego ubicadas en las partes altas hacia las partes bajas de riego del Valle del Mezquital. Se hace una mención especial de los sitios de muestreo que corresponden al río Tula en los diferentes tramos: a. El sitio de muestreo río Atotonilco de Tula tiene una altitud de 2120 m; b. El río Tula a 2039 m; c. Chiconautla, río Tula a 1823 m; d. Tlacotlapilco, río Tula a 1798 m; e. El Puente Solidaridad (Gran Cañón, El Alberto), río Tula a 1768 m; f. El río Tula, Ixmiquilpan a 1682 m; g. Tasquillo, río Tula a 1593 m; y h. La Presa Zimapán, río Tula a 1551 m.

El gradiente altitudinal entre El Gran Canal de aguas residuales que derivan del Valle de México, en el segundo sitio de muestreo que corresponde al puente PEMEX y tiene una altitud de 2248 m, y el último sitio de muestreo de aguas residuales que se localiza en La Presa Zimapán, río Tula a una altitud de 1551 m, tienen una diferencia de altitud de 697 m. Con estas diferencias de altitud entre las aguas de riego residuales arriba y las aguas de riego residuales abajo, las aguas se conducen por gravedad a través de toda la superficie agrícola de los valles intermontanos que constituyen el Valle del Mezquital.

Cuadro 27. Localización geográfica de los sitios de muestreo de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1.

No.	Sitio muestreo	T (°C)	Latitud Norte			Latitud Oeste			Altitud (m)
			°	'	''	°	'	''	
01	Puente PEMEX, distrito de riego Chiconautla	21	19	37	25	99	27	12	2193
02	Canal La Laminadora	24	19	47	13	99	56	47	2252
03	Emisor Norte, desemboca en La Laguna de Zumpango	19	19	47	11	99	10	55	2250
04	Gran Canal, con salida en Santa Ana Nextlalpan	22	19	44	11	99	06	02	2243
05	Laguna de Zumpango	24	19	46	5	99	07	26	2241
06	Canal cuadrado, en el distrito de riego Chiconautla	22	19	39	06	99	27	17	2240
07	Canal trapezoidal, a la entrada de Santa Ana Nextlalpan	19	19	45	41	99	41	49	2240
08	Canal cuadrado, a la entrada de Santa María Tonanitla	22	19	41	03	99	27	48	2237
09	Túnel Tequixquiac (salida)	23	19	54	14	99	09	46	2232
10	Salida túnel 1 (Tequixquiac). El Tajo	22	19	54	08	99	07	21	2231
11	Túnel nuevo Tequixquiac	23	19	49	30	99	07	39	2218
12	Canal salida Tequixquiac	24	19	55	48	99	09	36	2210
13	Río salado Apaxco (canal cementera)	22	20	58	11	99	11	40	2180
14	Río salado Apaxco	21	19	58	53	99	11	31	2165
15	Canal Beltrán. Atotonilco de Tula	22	20	16	44	99	12	17	2150
16	Canal chico. Texas	22	20	18	59	99	12	14	2147
17	Canal grande. Texas	22	20	17	12	99	12	11	2134
18	Río Tula, Atotonilco de Tula	22	20	13	30	99	13	48	2120
19	Canal revestido. Refinería Tula	23	20	35	60	99	16	05	2102
20	Canal de tierra, entrada a Atitalaquia	24	20	34	05	99	13	10	2100
21	Canal revestido, salida Cardonal (PEMEX)	23	20	31	17	99	14	51	2097
22	Canal entrada al Cardonal (La Quina)	24	20	35	50	99	14	37	2096
23	Frente al Hotel Las Plazas	23	20	32	30	99	19	47	2092
24	Canal de tierra. Delante de la Refinería Tula Praxair	21	20	33	10	99	18	16	2090
25	Puente El Salado. Atitalaquia	23	20	35	17	99	13	28	2089
26	Canal de tierra. San Francisco Bojay	24	20	50	56	99	20	13	2073
27	Canal lateral chico, salida Tula a Tepetitlán	22	20	44	05	99	20	58	2071
28	Canal chico de tierra, Julián Villagrán	22	20	59	05	99	21	30	2071
29	Canal de tierra. Santa Ana Ahuehuepan	23	20	08	43	99	21	60	2051
30	Puente verde, salida Tula a Tlahuelilpan	21	20	40	53	99	20	46	2049
31	Canal trapezoidal pequeño La Loma. Municipio de Tepetitlán	25	20	10	08	99	22	25	2048
32	Canal chico cortina. Presa Endhó	24	20	09	20	99	21	19	2041
33	Río Tula	21	20	32	55	99	20	09	2039
34	Canal dentro del pueblo Tepetitlán	24	20	11	21	99	23	54	2036
35	Canal trapezoidal pequeño (cruceo ferrocarril), entrada La Loma	24	20	10	49	99	22	03	2035
36	Canal revestido mediano, enseguida de la Presa Endhó	25	20	10	49	99	22	03	2035
37	Presa Endhó	21	20	09	59	99	22	25	2025
38	El Pacheco, rumbo a Actopan	22	20	15	48	99	02	15	2009
39	Salida presa Endhó (sifón)	18	20	09	29	99	21	26	2008
40	Canal trapezoidal Xochitlan	20	20	17	26	99	11	15	1997
41	Chapantongo	20	20	56	56	99	58	28	1990
42	Canal trapezoidal, salida de Progreso rumbo a Actopan	21	20	15	42	99	11	43	1996
43	Canal La Mora, rumbo a Progreso	20	20	19	59	99	12	54	1989
44	Puente con canal trapezoidal en compuerta. Santa María La Piedra	22	20	22	59	99	22	47	1983
45	Agua de pozo, donde se mezcla con agua negra (El Salvador)	19	20	18	03	99	59	17	1981
46	Canal cuadrado de piedra, entrada a La Presa Rojo Gómez	21	20	22	38	99	20	38	1979
47	Canal salida Actopan	22	20	16	51	99	58	35	1974
48	Pozo No. 6 (El Salvador)	21	20	18	23	99	59	21	1967
49	Presa Rojo Gómez	24	20	21	29	99	19	21	1965
50	Canal El Salvador (Pozo No. 4)	21	20	18	48	99	59	02	1963

...Cuadro 27

No.	Sitio muestreo	T (°C)	Latitud Norte			Latitud Oeste			Altitud (m)
			°	'	''	°	'	''	
51	Canal grande trapezoidal, delante de Xamaje	21	20	23	31	99	20	56	1952
52	Canal orilla redondeada Demaco. El Salvador	25	20	18	44	99	01	16	1945
53	Canal cuadrado grasoso (recién cubierto con loza)	19	20	21	36	99	12	25	1943
54	Drenaje profundo El Salvador, entrada al Balneario El Pocito	22	20	17	10	99	01	34	1941
55	Canal trapezoidal El Mejay	21	20	24	49	99	11	29	1920
56	Canal de tierra km 49. Carretera Actopan-Ixmiquilpan	21	20	22	45	99	02	26	1917
57	Canal km 51 (izquierda) rumbo a Ixmiquilpan	21	20	23	36	99	03	11	1917
58	Canal Yolotepec	21	20	24	33	99	05	46	1917
59	Canal km 55 1/2, entrada a Julián Villagrán	21	20	24	43	99	05	26	1915
60	Sifón de bombeo Gaxthó	22	20	23	15	99	04	35	1904
61	Puente entrada a Alfajayucan	22	20	25	51	99	21	55	1901
62	Canal de drenaje Gaxthó, junto a sifón de bombeo	21	20	23	12	99	04	37	1900
63	Canal trapezoidal revestido con seis compuertas. Loma Bonita, Alfajayucan	22	20	25	25	99	21	05	1891
64	Canal chico trapezoidal, junto al tanque de agua Santa María Xigui	22	20	27	15	99	21	01	1887
65	Canal trapezoidal con caída, delante del tanque de agua Santa María Xigui.	24	20	27	10	99	21	17	1884
66	Chilcuautla (Río Tula)	20	20	20	34	99	13	25	1882
67	Canal chico revestido Zozea, junto a la Secundaria Federal Alfajayucan	22	20	26	01	99	21	24	1878
68	Presa Vicente Aguirre. Zozea	30	20	26	13	99	22	09	1863
69	Canal arriba del cerro en camino a la UPN	27	20	26	05	99	08	16	1862
70	Canal revestido Chicoxathi	19	20	24	22	99	11	30	1835
71	Canal trapezoidal, El Durazno, Alfajayucan	23	20	29	40	99	20	31	1830
72	Presa Debohdé	23	20	29	03	99	07	14	1810
73	Canal trapezoidal La Estación, delante canal UTVM	20	20	30	44	99	10	50	1809
74	Canal cuadrado San Pedro Capula	20	20	30	45	99	09	25	1793
75	Canal ancho Presa Debohdé (enrejado)	20	20	30	34	99	07	53	1792
76	Salida presa Capula, cortina Debohdé	21	20	29	15	99	07	49	1791
77	Tlacotalpilco (Río Tula)	20	20	22	28	99	13	25	1790
78	Canal trapezoidal cerca del Balneario Tephé	22	20	26	08	99	09	24	1790
79	Escuela Secundaria Capula	22	20	30	24	99	08	09	1785
80	Canal trapezoidal (Maguey blanco)	20	20	25	24	99	10	10	1779
81	Canal revestido crucero Aguapía	21	20	30	10	99	09	46	1777
82	Canal ancho Los Pinos (Ixmiquilpan), junto a la tienda San Juditas	23	20	32	47	99	11	18	1753
83	Canal Manzana El Deca	18	20	29	52	99	17	49	1744
84	Canal El Tephé, junto escuela, cerca de Dios Padre	20	20	27	57	99	11	44	1742
85	San Francisco, Alfajayucan	21	20	29	53	99	23	16	1741
86	Canal de piedra, salida de Ixmiquilpan	20	20	29	51	99	15	19	1739
87	Canal UTVM (La Joya)	21	20	30	32	99	11	56	1739
88	Canal trapezoidal (2), entrada a Dexthó	19	20	30	48	99	16	25	1724
89	Canal cuadrado, salida de Tasquillo	22	20	31	30	99	19	26	1723
90	Canal Dexthó (1)	20	20	29	59	99	16	17	1711
91	Salida a Capula desde Ixmiquilpan	21	20	29	12	99	13	38	1706
92	Río frente mercado Ixmiquilpan	21	20	29	08	99	13	03	1700
93	Río Tula, frente estatua de Don Quijote	20	20	29	51	99	13	13	1691
94	Grutas de Tolantongo	32	20	39	48	99	00	20	1662
95	Manantial en un cañón rumbo a La Florida	27	20	34	23	99	60	38	1658
96	Balneario Hotel Tzindejé. Tasquillo	32	20	33	04	99	18	46	1625
97	Balneario Tasquillo	21	20	33	00	99	18	31	1607
98	Balneario Tasquillo, agua de manantial	29	20	33	00	99	18	31	1607
99	Puente Tasquillo. Río Tula	21	20	35	34	99	21	49	1552
100	Presa Zimapán	23	20	40	39	99	29	19	1555

Cuadro 28. Localización geográfica de los sitios de muestreo de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2.

No.	Sitio muestreo	T (°C)	Latitud Norte			Latitud Oeste			Altitud (m)
			°	'	''	°	'	''	
01	Presa San Jerónimo. Frailes Actopan	14	20	13	58	98	50	51	2614
02	Puente PEMEX	21	19	37	25	99	02	42	2248
03	Canal La Laminadora	20	19	47	13	99	05	34	2255
04	Canal revestido al norte de Zumpango	18	19	47	12	99	09	55	2252
05	Canal cuadrado Distrito de Riego Chiconautla	20	19	39	06	99	02	44	2246
06	Laguna de Zumpango	18	19	45	27	99	07	59	2246
07	Canal Santa María Tonanitla	22	19	41	03	99	02	40	2243
08	Canal de aguas negras Santa Ana Nextlalpan	21	19	44	11	99	05	59	2243
09	Canal revestido Santa Ana Nextlalpan	21	19	44	05	99	04	06	2237
10	Túnel Tequixquiac (salida)	19	19	54	14	99	08	46	2232
11	Túnel nuevo Tequixquiac. Manuel Ávila Camacho	19	19	49	00	99	06	39	2218
12	Canal salida de Tequixquiac	19	19	58	24	99	08	36	2210
13	Río salado Apaxco (canal cementera)	21	19	58	11	99	10	40	2180
14	Canal cementera con compuertas a un lado de la cementera	20	19	58	11	99	10	40	2180
15	Río salado Apasco	19	19	57	53	99	10	31	2165
16	Cal Beltrán. Atotonilco de Tula	19	20	01	34	99	12	17	2150
17	Canal chico. Texas	20	20	01	48	99	12	14	2147
18	Canal grande Texas	19	20	01	43	99	12	11	2134
19	Río Atotonilco de Tula	20	20	01	15	99	12	48	2120
20	Canal chico enseguida de canal revestido rumbo a Atotonilco	20	20	01	15	99	12	48	2120
21	Canal revestido. Refinería Tula	20	20	03	30	99	16	05	2102
22	Canal de tierra. Entrada Atitalaquia	22	20	03	24	99	13	10	2100
23	Canal revestido. Salida Cardonal (PEMEX)	22	20	03	08	99	13	51	2097
24	Canal de tierra Teteltipan	21	20	06	60	99	12	16	2097
25	Canal entrada al Cardonal (La Quina)	21	20	03	33	99	13	37	2096
26	Frente Hotel Las Plazas	22	20	03	14	99	18	47	2092
27	Canal de tierra. Delante de la Refinería Tula Praxair	22	20	03	19	99	18	16	2090
28	Puente El Salado. Atitalaquia	21	20	03	32	99	13	28	2089
29	Canal Dendhó. Pueblo Iturbide	21	20	44	33	99	18	59	2079
30	Chapantongo	18	20	18	39	99	23	46	2077
31	Canal revestido División Tula-Tepetitlán	22	20	04	59	99	20	13	2077
32	Cieneguillas	23	20	42	29	99	02	06	2076
33	Canal revestido San Francisco	22	20	05	54	99	20	32	2073
34	Canal chico carretera Tula-Tepetitlan. Instituto Canadiense	22	20	04	10	98	19	55	2072
35	Canal de tierra. Salida Tlahuelilpan-Tula. 2	21	20	07	19	99	15	10	2056
36	Canal de tierra Santa Ana Ahuehuepan	21	20	07	25	99	20	38	2055
37	Canal El Tinaco. Tezontepec	20	20	09	29	99	13	53	2048
38	Canal de tierra grande, salida Tula-Tlahuelilpan. Puente verde	20	20	03	57	99	19	46	2047
39	Cabal de tierra, salida Tlahuelilpan-Tula.1-a	21	20	07	39	99	14	31	2046
40	Cabal de tierra, salida Tlahuelilpan-Tula.1-b	21	20	07	39	99	14	31	2046
41	Canal Requena Tlahuelilpan	21	20	09	21	99	13	50	2044
42	Río Tula	22	20	03	11	99	20	09	2039
43	Canal chico revestido Pedro Antonio Anaya	22	20	09	18	99	21	15	2032
44	Canal trapezoidal pequeño La Loma. Crucero de ferrocarril	21	20	10	07	99	22	24	2029
45	Canal revestido Tezontepec. General Antonio Anaya	20	20	09	30	99	20	36	2029
46	Canal revestido mediano, enseguida de la presa, cerca de la vía	22	20	09	50	99	22	02	2028
47	Canal Tepetitlan. Dentro de pueblo	20	20	11	21	99	22	54	2026
48	Canal grande revestido, antes de San Francisco Alfajayucan	21	20	08	59	99	22	25	2025
49	Canal revestido frente a Aceros La Loma. Tepetitlán	21	20	10	13	99	22	45	2023
50	Sifón, Presa Endhó	18	20	09	29	99	21	26	2018
51	Presa Endhó	23	20°	09	03	99°	22	28	2017
52	Canal chico cuadrado revestido. Cortina Presa Endhó	18°	20°	09	38	99°	21	47	2014
53	Canal rumbo ITVM km 33	20°	20°	12	01	99°	13	17	2008



...Cuadro 28

No.	Sitio muestreo	T (°C)	Latitud Norte			Latitud Oeste			Altitud (m)
			°	'	''	°	'	''	
54	Río Grutas Tolantongo. El Arenalito	9	20	39	23	99	02	59	2007
55	Canal revestido tierra, Tezontepec-Anaya	17	20	10	54	99	17	38	2006
56	Canal La Mora. Rumbo a Progreso	19	20	18	59	99	11	54	1992
57	Canal Xochitlan	20	20	17	26	99	11	15	1992
58	Manantiales Tezontepec	20	20	11	28	99	16	44	1989
59	Presa Rojo Gómez	20	20	21	30	99	19	22	1981
60	Pozo No. 6 (El Salvador)	23	20	18	24	98	59	21	1970
61	Río Tula. Tezontepec	18	20	11	39	99	16	54	1960
62	Canal grasoso cuadrado	20	20	20	35	99	12	23	1948
63	Canal de tierra (Grutas de Cocaxi)	16	20	20	47	99	01	47	1924
64	Canal revestido km 51	20	20	22	37	99	03	12	1921
65	El Mejay. Canal trapezoidal Chilcuautla	23	20	23	48	99	11	28	1920
66	Canal de tierra km 49. Carretera Actopan-Ixmiquilpan	19	20	21	45	99	02	26	1916
67	Canal revestido km 55 1/2	20	20	23	43	99	05	25	1914
68	Canal revestido Yolotepec	20	20	23	22	99	04	17	1912
69	Puente Alfajayucan	16	20	24	51	99	20	55	1869
70	Presa Vicente Aguirre. Zozea	20	20	26	00	99	21	43	1857
71	Canal revestido grande, cruceo Santa María	20	20	27	33	99	20	29	1845
72	Canal grande revestido, Santa María Xigui	21	20	27	53	99	20	04	1845
73	Chilcuautla (Río Tula)	20	20	19	35	99	13	33	1823
74	Presa Debodhé	15	20	29	02	99	07	17	1814
75	Canal revestido chico, Alfajayucan	21	20	28	29	99	21	57	1811
76	Canal trapezoidal, Maguey Blanco	20	20	25	24	99	10	09	1808
77	Canal trapezoidal con túnel entrada frente Mejay	22	20	24	33	99	12	21	1798
78	Río Tula Tlacotalpilco	20	20	22	27	99	13	25	1798
79	Canal revestido con compuertas antes Balneario Tephe	20	20	26	08	99	09	24	1794
80	Canal ancho presa Debodhé (enrejado)	13	20	29	33	99	06	54	1793
81	Salida presa Capula. Cortina Debodhé	14	20	29	25	99	06	45	1791
82	Canal revestido con algas. La estación	15	20	29	43	99	09	50	1791
83	Canal cuadrado chico. San Pedro Capula	16	20	29	45	99	09	25	1790
84	Escuela Secundaria Capula	14	20	30	24	99	08	09	1782
85	Canal revestido chico, Guapia	16	20	30	10	99	08	46	1777
86	Canal de manantial. San Francisco Alfajayucan	21	20	28	57	99	23	15	1776
87	Balneario Tlacotalpilco	42	20	22	32	99	17	46	1775
88	Agua de nacimiento carretera Guapia	10	20	30	17	99	08	35	1774
89	Río Tula. Puente Solidaridad (Gran Cañón) El Alberto	20	20	24	46	99	12	55	1768
90	Canal de tierra UTVM. La Joya	14	20	29	27	99	10	55	1746
91	Canal de piedra salida Ixmiquilpan	18	20	28	51	99	15	19	1736
92	Canal revestido Dexthó. 1	18	20	29	51	99	16	23	1733
93	Canal cuadrado después Ixmiquilpan	22	20	31	29	99	19	26	1729
94	Canal ancho revestido Dexthó (entrada). 2	17	20	28	59	99	16	17	1728
95	Salida a Capula desde Ixmiquilpan	16	20	29	11	99	12	39	1692
96	Río Tula, Ixmiquilpan	16	20	28	47	99	13	25	1682
97	Río Tula, Ixmiquilpan frente mercado	15	20	28	59	99	12	59	1666
98	Hotel Balneario Tzindejé	30	20	33	04	99	18	46	1640
99	Balneario Tasquillo. Agua de manantial. 1	30	20	32	59	99	17	31	1629
100	Balneario Tasquillo. Agua de manantial. 2	30	20	32	59	99	17	31	1629
101	Balneario Tasquillo. Río Tula	19	20	33	01	99	17	31	1623
102	Cañón, camino a La Florida	21	20	34	23	98	59	38	1616
103	Puente Tasquillo, Río Tula	19	20	34	32	99	20	46	1593
104	Agua cascada grutas Tolantongo	33	20	38	54	99	00	27	1393
105	Cascada grutas Tolantongo	33	20	38	54	99	00	27	1393
106	Presa Zimapán	22	20	39	39	99	29	19	1551

## 6.2 Composición iónica de las aguas residuales

La composición iónica de las aguas residuales del Muestreo 1, se observa en el Cuadro 29. La relación  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  se presentó como sigue:  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} < 3 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  (8 muestras);  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  entre 3-6  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$  (63 muestras);  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  entre 6-9  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$  (23 muestras); y  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} > 9 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  (6 muestras).

La composición iónica de las aguas residuales del Muestreo 2, se observa en el Cuadro 30. La relación  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  se presentó como sigue:  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} < 3 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  (18 muestras);  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  entre 3-6  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$  (69 muestras);  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  entre 6-9  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$  (12 muestras) y  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} > 9 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  (7 muestras).

La composición química de las aguas en ambos muestreos, fue: sulfático-clorhídrico-bicarbonatada. Es decir, en estas aguas el mayor contenido de aniones fueron los bicarbonatos, seguido de los cloruros y sulfatos.

En los suelos del Valle del Mezquital, localizados en valles intermontanos y que son regados con aguas residuales, en las que de manera predominante se tienen bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) y que poseen una composición  $\text{SO}_4^{2-}\text{-Cl}^-\text{-HCO}_3^-$ , se presentan con mucha frecuencia condiciones físico-geográficas de pequeñas depresiones y bajíos suaves, en donde se saturarán en alguna medida con iones de sodio  $\text{Na}^+$  los sistemas coloidales de estos suelos. Esta saturación paulatina de los suelos con sodio intercambiable  $X_{\text{Na}}$  se presentara con mucha intensidad en donde se presenten procesos de formación de soda  $\text{HCO}_3^-\text{-CO}_3^{2-}$ . Sin embargo, cabe aclarar que el desarrollo de procesos de sodificación de los suelos, debido al riego con aguas residuales de esta composición se presentara en el tiempo en forma sucesiva y dilatada debido a los excesos de aplicación de las láminas de riego de aguas residuales que se practica desde hace mucho tiempo en el Valle del Mezquital. También se debe mencionar que un alto porcentaje de la superficie irrigada del Valle del Mezquital posee suelos delgados, a excepción de los suelos del Valle de Tula, en donde se tienen suelos medianamente profundos<sup>151</sup>.

Cuadro 29. Composición iónica de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1.

No.	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	$\Sigma$	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	$\Sigma$	mg L <sup>-1</sup>	RSE	%ERROR
			mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>							mmol L <sup>-1</sup>			mg L <sup>-1</sup>		
01	7.00	2212	1.60	3.60	15.21	1.06	21.47	0.00	12.22	8.00	0.71	20.93		1571	1.27
			32.06	43.74	349.83	41.44		0.00	745.42	283.60	34.10	1530			
			0.80	1.80	15.21	1.06		0.00	12.22	8.00	0.35	39.44			
02	7.40	2286	1.80	4.50	14.07	1.61	21.98	0.00	16.81	5.00	0.72	22.53		1765	1.24
			36.07	54.67	323.61	62.95		0.00	1025.41	177.25	34.58	1714			
			0.90	2.25	14.07	1.61		0.00	16.81	5.00	0.36	41.00			
03	7.80	695	2.00	1.40	3.10	0.31	6.81	0.00	4.74	1.95	0.37	7.06		536	1.80
			40.08	17.01	71.30	12.12		0.00	289.14	69.12	17.77	516			
			1.00	0.70	3.10	0.31		0.00	4.74	1.95	0.18	11.98			
04	7.10	1930	1.90	3.60	12.44	0.98	18.92	0.00	11.51	6.10	0.84	18.45		1398	1.26
			38.07	43.74	286.12	38.31		0.00	702.11	216.24	40.34	1364			
			0.95	1.80	12.44	0.98		0.00	11.51	6.10	0.42	34.20			
05	7.70	565	1.40	1.20	2.32	0.41	5.33	0.00	3.20	1.70	0.56	5.46		403	1.20
			28.05	14.58	53.36	16.03		0.00	195.20	60.26	26.89	394			
			0.70	0.60	2.32	0.41		0.00	3.20	1.70	0.28	9.21			
06	7.10	2200	1.50	4.00	14.19	1.06	20.75	0.00	12.67	7.90	0.98	21.55		1585	1.89
			30.06	48.60	326.37	41.44		0.00	772.87	280.05	47.06	1546			
			0.75	2.00	14.19	1.06		0.00	12.67	7.90	0.49	39.06			
07	7.20	2172	1.35	4.75	13.24	0.96	20.30	0.00	12.69	7.50	0.86	21.05		1531	1.81
			27.05	57.71	304.52	37.53		0.00	774.09	265.87	41.30	1508			
			0.67	2.37	13.24	0.96		0.00	12.69	7.50	0.43	37.86			
08	7.10	2182	1.60	4.10	14.21	1.07	20.98	0.00	13.40	7.40	0.91	21.71		1618	1.71
			32.06	49.81	326.83	41.83		0.00	817.40	262.33	43.70	1573			
			0.80	2.05	14.21	1.07		0.00	13.40	7.40	0.45	39.38			
09	7.10	2085	1.90	3.70	13.05	1.02	19.67	0.00	11.32	6.75	0.88	18.95		1431	1.86
			38.07	44.95	300.15	39.88		0.00	690.52	239.28	42.26	1395			
			0.95	1.85	13.05	1.02		0.00	11.32	6.75	0.44	35.38			
10	7.20	2118	1.70	3.80	13.62	1.05	20.17	0.00	12.74	7.10	0.83	20.67		1539	1.22
			34.06	46.17	313.26	41.05		0.00	777.14	251.69	39.86	1503			
			0.85	1.90	13.62	1.05		0.00	12.74	7.10	0.41	37.67			
11	7.00	2132	1.90	3.50	13.50	1.03	19.93	0.00	12.68	6.80	0.95	20.43		1552	1.24
			38.07	42.52	310.50	40.27		0.00	773.48	241.06	45.62	1491			
			0.95	1.75	13.50	1.03		0.00	12.68	6.80	0.47	37.18			
12	7.30	2190	1.70	3.80	14.56	1.00	21.06	0.00	13.71	7.10	0.78	21.59		1615	1.24
			34.06	46.17	334.88	39.10		0.00	836.31	251.69	37.46	1579			
			0.85	1.90	14.56	1.00		0.00	13.71	7.10	0.39	39.51			
13	7.30	2167	2.00	4.20	13.82	1.02	21.04	0.00	13.05	8.00	0.72	21.77		1605	1.71
			40.08	51.03	317.86	39.88		0.00	796.05	283.60	34.58	1563			
			1.00	2.10	13.82	1.02		0.00	13.05	8.00	0.36	39.35			
14	7.30	2078	2.10	3.80	12.53	0.99	19.42	0.00	11.75	7.30	0.82	19.87		1447	1.15
			42.08	46.17	288.19	38.70		0.00	716.75	258.78	39.38	1430			
			1.05	1.90	12.53	0.99		0.00	11.75	7.30	0.41	35.93			
15	7.40	2105	2.00	4.20	13.43	1.01	20.64	0.00	13.40	7.10	0.74	21.24		1587	1.43
			40.08	51.03	308.89	39.49		0.00	817.40	251.69	35.54	1544			
			1.00	2.10	13.43	1.01		0.00	13.40	7.10	0.37	38.41			

...Cuadro 29

No.	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ	mg L <sup>-1</sup>	RSE	%ERROR
			mmol L <sup>-1</sup>										mmol L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	
16	7.30	2129	2.40	3.74	13.06	1.02	20.22	0.00	12.83	7.10	0.74	20.67		1558	1.10
			48.09	45.44	300.38	39.88		0.00	782.63	251.69	35.54	1503			
			1.20	1.87	13.06	1.02		0.00	12.83	7.10	0.37	37.45			
17	7.40	2555	2.10	4.40	17.06	1.01	24.57	0.00	17.27	7.10	0.81	25.18		1917	1.23
			42.08	53.46	392.38	39.49		0.00	1053.47	251.69	38.90	1871			
			1.05	2.20	17.06	1.01		0.00	17.27	7.10	0.40	46.09			
18	7.50	2092	2.05	4.50	13.35	1.02	20.92	0.00	13.59	7.00	0.85	21.44		1604	1.23
			41.08	54.67	307.05	39.88		0.00	828.99	248.15	40.82	1560			
			1.02	2.25	13.35	1.02		0.00	13.59	7.00	0.42	38.65			
19	6.80	1579	1.20	3.00	9.92	0.78	14.90	0.00	9.47	5.05	0.86	15.38		1150	1.59
			24.04	36.45	228.16	30.49		0.00	577.67	179.02	41.30	1117			
			0.60	1.50	9.92	0.78		0.00	9.47	5.05	0.43	27.75			
20	6.70	2073	1.40	2.60	14.66	0.71	19.37	0.00	13.81	4.30	0.78	18.89		1492	1.25
			28.05	31.59	337.18	27.76		0.00	842.41	152.43	37.46	1456			
			0.70	1.30	14.66	0.71		0.00	13.81	4.30	0.39	35.87			
21	6.80	1510	1.20	3.00	9.16	0.75	14.11	0.00	8.77	5.00	0.83	14.60		1075	1.71
			24.04	36.45	210.68	29.32		0.00	534.97	177.25	39.86	1052			
			0.60	1.50	9.16	0.75		0.00	8.77	5.00	0.41	26.19			
22	6.80	1560	1.50	3.30	9.44	0.76	15.00	0.00	9.44	5.00	0.96	15.40		1150	1.32
			30.06	40.09	217.12	29.71		0.00	575.84	177.25	46.10	1116			
			0.75	1.65	9.44	0.76		0.00	9.44	5.00	0.48	27.52			
23	6.90	1495	1.40	3.00	9.34	0.77	14.51	0.00	8.95	5.00	0.92	14.87		1105	1.23
			28.05	36.45	214.82	30.10		0.00	545.95	177.25	44.18	1076			
			0.70	1.50	9.34	0.77		0.00	8.95	5.00	0.46	26.72			
24	6.90	1590	1.20	0.95	12.96	0.18	15.29	0.00	10.30	5.10	0.27	15.67		1193	1.23
			24.04	11.54	298.08	7.03		0.00	628.30	180.79	12.96	1162			
			0.60	0.47	12.96	0.18		0.00	10.30	5.10	0.13	29.74			
25	6.90	1439	1.60	3.40	8.35	0.76	14.11	0.00	8.77	5.00	0.89	14.66		1075	1.91
			32.06	41.31	192.05	29.71		0.00	534.97	177.25	42.74	1050			
			0.80	1.70	8.35	0.76		0.00	8.77	5.00	0.44	25.82			
26	7.00	1597	1.80	3.30	9.78	0.78	15.66	0.00	8.86	5.00	1.25	15.11		1142	1.79
			36.07	40.09	224.94	30.49		0.00	540.46	177.25	60.03	1109			
			0.90	1.65	9.78	0.78		0.00	8.86	5.00	0.62	27.59			
27	7.00	1609	1.80	3.10	9.61	0.81	15.32	0.00	9.13	5.10	1.44	15.67		1150	1.13
			36.07	37.66	221.03	31.67		0.00	556.93	180.79	69.16	1133			
			0.90	1.55	9.61	0.81		0.00	9.13	5.10	0.72	27.82			
28	7.00	1642	1.90	3.20	9.59	0.80	15.49	0.00	9.24	5.30	1.37	15.91		1182	1.34
			38.07	38.88	220.57	31.28		0.00	563.64	187.88	65.80	1146			
			0.95	1.60	9.59	0.80		0.00	9.24	5.30	0.68	28.16			
29	7.00	1609	1.90	3.10	9.65	0.82	15.47	0.00	9.77	5.00	1.32	16.09		1195	1.96
			38.07	37.66	221.95	32.06		0.00	595.97	177.25	63.39	1166			
			0.95	1.55	9.65	0.82		0.00	9.77	5.00	0.66	28.40			
30	7.00	1670	4.10	3.10	8.27	0.74	16.21	0.00	8.54	4.40	2.88	15.82		1186	1.22
			82.16	37.66	190.21	28.93		0.00	520.94	155.98	138.32	1154			
			2.05	1.55	8.27	0.74		0.00	8.54	4.40	1.44	26.99			

...Cuadro 29

No.	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ	mg L <sup>-1</sup>	RSE	%ERROR
			mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>											mmol L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>
31	7.10	1680	2.10	3.50	9.40	0.85	15.85	0.00	9.01	5.55	1.73	16.29		1193	1.37
			42.08	42.52	216.20	33.23		0.00	549.61	196.74	83.09		1163		
			1.05	1.75	9.40	0.85		0.00	9.01	5.55	0.86		28.47		
32	7.10	1672	2.00	3.20	10.37	0.82	16.39	0.00	9.69	5.30	1.79	16.78		1249	1.18
			40.08	38.88	238.51	32.06		0.00	591.09	187.88	85.97		1214		
			1.00	1.60	10.37	0.82		0.00	9.69	5.30	0.89		29.67		
33	7.00	1121	2.20	2.30	5.57	0.53	10.60	0.00	5.71	3.47	1.03	10.21		760	1.87
			44.08	27.94	128.11	20.72		0.00	348.31	123.01	49.47		741		
			1.10	1.15	5.57	0.53		0.00	5.71	3.47	0.51		18.04		
34	7.00	1670	2.10	3.80	9.97	0.83	16.70	0.00	8.87	5.60	1.74	16.21		1202	1.49
			42.08	46.17	229.31	32.45		0.00	541.07	198.52	83.57		1173		
			1.05	1.90	9.97	0.83		0.00	8.87	5.60	0.87		29.09		
35	7.00	1650	2.10	3.30	10.28	0.82	16.50	0.00	8.90	5.60	1.62	16.12		1199	1.16
			42.08	40.09	236.44	32.06		0.00	542.90	198.52	77.80		1169		
			1.05	1.65	10.28	0.82		0.00	8.90	5.60	0.81		29.11		
36	6.80	1352	2.70	3.20	6.75	0.60	13.25	0.00	8.22	4.20	1.20	13.62		1008	1.38
			54.10	38.88	155.25	23.46		0.00	501.42	148.89	57.63		979		
			1.35	1.60	6.75	0.60		0.00	8.22	4.20	0.60		23.32		
37	7.20	1211	1.80	2.20	6.76	0.66	11.42	0.00	7.64	3.60	0.59	11.83		888	1.76
			36.07	26.73	155.48	25.80		0.00	466.04	127.62	28.33		866		
			0.90	1.10	6.76	0.66		0.00	7.64	3.60	0.29		20.95		
38	7.30	1098	1.30	2.50	5.85	0.61	10.26	0.00	4.13	5.30	1.19	10.62		734	1.72
			26.05	30.37	134.55	23.85		0.00	251.93	187.88	57.15		711		
			0.65	1.25	5.85	0.61		0.00	4.13	5.30	0.59		18.38		
39	7.30	1268	2.80	2.70	5.99	0.59	12.08	0.00	7.27	3.65	0.88	11.80		887	1.17
			56.11	32.80	137.77	23.06		0.00	443.47	129.39	42.26		864		
			1.40	1.35	5.99	0.59		0.00	7.27	3.65	0.44		20.69		
40	7.20	1340	3.00	2.60	7.19	0.61	13.40	0.00	8.75	3.80	1.24	13.79		1030	1.43
			60.12	31.59	165.37	23.85		0.00	533.75	134.71	59.55		1008		
			1.50	1.30	7.19	0.61		0.00	8.75	3.80	0.62		23.77		
41	7.00	387	1.30	0.90	1.45	0.30	3.95	0.00	2.34	1.20	0.31	3.85		290	1.28
			26.05	10.93	33.35	11.73		0.00	142.74	42.54	14.88		282		
			0.65	0.45	1.45	0.30		0.00	2.34	1.20	0.15		6.54		
42	6.90	1706	2.20	3.20	10.02	0.83	16.25	0.00	9.89	5.60	1.20	16.69		1234	1.34
			44.08	38.88	230.46	32.45		0.00	603.29	198.52	57.63		1205		
			1.10	1.60	10.02	0.83		0.00	9.89	5.60	0.60		29.64		
43	7.10	1268	2.60	2.80	5.85	0.60	11.85	0.00	7.00	3.60	0.85	11.45		861	1.72
			52.10	34.02	134.55	23.46		0.00	427.00	127.62	40.82		839		
			1.30	1.40	5.85	0.60		0.00	7.00	3.60	0.42		20.17		
44	7.20	1278	2.60	3.30	5.88	0.63	12.41	0.00	7.03	4.50	1.22	12.75		921	1.35
			52.10	40.09	135.24	24.63		0.00	428.83	159.52	58.59		899		
			1.30	1.65	5.88	0.63		0.00	7.03	4.50	0.61		21.60		
45	7.10	2162	2.80	2.60	15.37	0.64	21.41	0.00	12.84	8.05	1.06	21.95		1624	1.25
			56.11	31.59	353.51	25.02		0.00	783.24	285.37	50.91		1585		
			1.40	1.30	15.37	0.64		0.00	12.84	8.05	0.53		40.13		

...Cuadro 29

No.	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ	mg L <sup>-1</sup>	RSE	%ERROR
			mmol L <sup>-1</sup>										mmol L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	
46	7.30	1109	2.00	2.70	6.04	0.58	11.32	0.00	6.78	3.90	1.08	11.76		854	1.91
			40.08	32.80	138.92	22.67		0.00	413.58	138.25	51.87		838		
			1.00	1.35	6.04	0.58		0.00	6.78	3.90	0.54		20.19		
47	7.10	1265	2.70	2.90	5.71	0.62	11.93	0.00	5.46	4.80	1.37	11.63		835	1.27
			54.10	35.23	131.33	24.24		0.00	333.06	170.16	65.80		813		
			1.35	1.45	5.71	0.62		0.00	5.46	4.80	0.68		20.07		
48	7.40	2434	4.60	4.10	13.28	1.20	23.18	0.00	15.20	7.60	1.21	24.01		1775	1.76
			92.18	49.81	305.44	46.92		0.00	927.20	269.42	58.11		1749		
			2.30	2.05	13.28	1.20		0.00	15.20	7.60	0.60		42.23		
49	7.10	2114	4.60	3.80	11.61	0.72	20.73	0.00	11.13	8.80	1.46	21.39		1549	1.57
			92.18	46.17	267.03	28.15		0.00	678.93	311.96	70.12		1494		
			2.30	1.90	11.61	0.72		0.00	11.13	8.80	0.73		37.19		
50	8.20	927	1.60	2.20	4.70	0.59	9.09	0.00	4.70	3.80	0.88	9.38		672	1.57
			32.06	26.73	108.10	23.06		0.00	286.70	134.71	42.26		653		
			0.80	1.10	4.70	0.59		0.00	4.70	3.80	0.44		16.13		
51	7.20	2157	4.70	3.10	12.36	0.58	20.74	0.00	12.67	7.40	1.25	21.32		1589	1.38
			94.18	37.66	284.28	22.67		0.00	772.87	262.33	60.03		1534		
			2.35	1.55	12.36	0.58		0.00	12.67	7.40	0.62		37.53		
52	7.20	1315	2.80	2.80	6.73	0.69	13.02	0.00	8.62	4.00	0.84	13.46		1014	1.66
			56.11	34.02	154.79	26.97		0.00	525.82	141.80	40.34		979		
			1.40	1.40	6.73	0.69		0.00	8.62	4.00	0.42		23.26		
53	7.00	1296	2.80	2.60	6.84	0.59	12.83	0.00	8.74	3.70	0.80	13.24		994	1.57
			56.11	31.59	157.32	23.06		0.00	533.14	131.16	38.42		970		
			1.40	1.30	6.84	0.59		0.00	8.74	3.70	0.40		22.97		
54	7.20	1987	4.10	2.70	12.57	0.70	20.07	0.00	12.13	7.55	1.03	20.71		1526	1.57
			82.16	32.80	289.11	27.37		0.00	739.93	267.64	49.47		1488		
			2.05	1.35	12.57	0.70		0.00	12.13	7.55	0.51		36.86		
55	7.40	1265	2.70	2.70	6.41	0.59	12.40	0.00	8.08	3.75	0.90	12.73		947	1.31
			54.10	32.80	147.43	23.06		0.00	492.88	132.93	43.22		926		
			1.35	1.35	6.41	0.59		0.00	8.08	3.75	0.45		21.98		
56	7.40	1997	4.10	2.90	12.38	0.59	19.97	0.00	11.53	7.70	1.17	20.40		1505	1.07
			82.16	35.23	284.74	23.06		0.00	703.33	272.96	56.19		1457		
			2.05	1.45	12.38	0.59		0.00	11.53	7.70	0.58		36.28		
57	7.40	2046	2.85	3.20	13.22	0.59	19.86	0.00	11.70	7.70	1.17	20.57		1503	1.76
			57.11	38.88	304.06	23.06		0.00	713.70	272.96	56.19		1465		
			1.42	1.60	13.22	0.59		0.00	11.70	7.70	0.58		36.81		
58	7.70	2008	2.60	2.80	13.13	0.59	19.12	0.00	10.45	8.00	1.17	19.62		1432	1.29
			52.10	34.02	301.99	23.06		0.00	637.45	283.60	56.19		1388		
			1.30	1.40	13.13	0.59		0.00	10.45	8.00	0.58		35.45		
59	7.60	2020	3.20	2.90	13.31	0.59	20.00	0.00	12.03	7.60	1.17	20.80		1510	1.96
			64.12	35.23	306.13	23.06		0.00	733.83	269.42	56.19		1487		
			1.60	1.45	13.31	0.59		0.00	12.03	7.60	0.58		37.16		
60	7.60	2050	3.70	3.10	11.77	0.59	19.16	0.00	11.01	7.50	1.13	19.64		1446	1.24
			74.14	37.66	270.71	23.06		0.00	671.61	265.87	54.27		1397		
			1.85	1.55	11.77	0.59		0.00	11.01	7.50	0.56		34.83		

...Cuadro 29

No.	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ	mg L <sup>-1</sup>	RSE	%ERROR
			mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>											mmol L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>
61	7.60	1240	3.10	2.50	5.71	0.61	11.92	0.00	6.45	4.00	1.21	11.66		862	1.10
			62.12	30.37	131.33	23.85		0.00	393.45	141.80	58.11		841		
			1.55	1.25	5.71	0.61		0.00	6.45	4.00	0.60		20.17		
62	7.50	2096	3.70	2.00	13.65	0.42	19.77	0.00	9.69	8.20	1.46	19.35		1420	1.07
			74.14	24.30	313.95	16.42		0.00	591.09	290.69	70.12		1380		
			1.85	1.00	13.65	0.42		0.00	9.69	8.20	0.73		35.54		
63	7.70	1080	2.10	2.40	5.41	0.59	10.50	0.00	5.25	4.05	0.99	10.29		750	1.01
			42.08	29.16	124.43	23.06		0.00	320.25	143.57	47.54		730		
			1.05	1.20	5.41	0.59		0.00	5.25	4.05	0.49		18.04		
64	7.50	1114	2.20	2.50	5.75	0.58	11.03	0.00	6.19	3.50	0.95	10.64		799	1.80
			44.08	30.37	132.25	22.67		0.00	377.59	124.07	45.62		776		
			1.10	1.25	5.75	0.58		0.00	6.19	3.50	0.47		18.84		
65	7.20	1095	2.10	2.80	5.26	0.58	10.74	0.00	6.44	3.60	0.97	11.01		806	1.24
			42.08	34.02	120.98	22.67		0.00	392.84	127.62	46.58		786		
			1.05	1.40	5.26	0.58		0.00	6.44	3.60	0.48		18.81		
66	7.30	1529	3.90	4.00	6.14	0.66	14.70	0.00	9.24	4.75	1.06	15.05		1104	1.18
			78.15	48.60	141.22	25.80		0.00	563.64	168.38	50.91		1076		
			1.95	2.00	6.14	0.66		0.00	9.24	4.75	0.53		25.27		
67	7.20	1089	2.10	2.60	5.72	0.58	11.00	0.00	6.33	3.45	0.95	10.73		796	1.24
			42.08	31.59	131.56	22.67		0.00	386.13	122.30	45.62		781		
			1.05	1.30	5.72	0.58		0.00	6.33	3.45	0.47		18.90		
68	7.50	1020	1.10	1.70	6.33	0.68	9.81	0.00	4.76	4.20	1.10	10.06		714	1.26
			22.04	20.65	145.59	26.58		0.00	290.36	148.89	52.83		706		
			0.55	0.85	6.33	0.68		0.00	4.76	4.20	0.55		17.92		
69	7.30	1670	1.20	1.60	13.15	0.58	16.53	0.00	7.89	8.00	1.17	17.06		1223	1.58
			24.04	19.44	302.45	22.67		0.00	481.29	283.60	56.19		1189		
			0.60	0.80	13.15	0.58		0.00	7.89	8.00	0.58		31.60		
70	7.30	1311	3.00	2.70	6.70	0.58	12.98	0.00	8.74	3.80	0.91	13.45		1009	1.78
			60.12	32.80	154.10	22.67		0.00	533.14	134.71	43.70		981		
			1.50	1.35	6.70	0.58		0.00	8.74	3.80	0.45		23.12		
71	7.50	1111	2.00	1.30	6.71	0.57	10.58	0.00	5.63	4.40	0.93	10.96		796	1.76
			40.08	15.79	154.33	22.28		0.00	343.43	155.98	44.66		776		
			1.00	0.65	6.71	0.57		0.00	5.63	4.40	0.46		19.42		
72	7.60	1888	1.90	2.80	13.47	0.52	18.69	0.00	8.00	8.60	1.44	18.04		1295	1.77
			38.07	34.02	309.81	20.33		0.00	488.00	304.87	69.16		1264		
			0.95	1.40	13.47	0.52		0.00	8.00	8.60	0.72		33.66		
73	7.40	1554	3.40	4.40	6.82	0.62	15.24	0.00	7.67	6.10	1.09	14.86		1075	1.26
			68.13	53.46	156.86	24.24		0.00	467.87	216.24	52.35		1039		
			1.70	2.20	6.82	0.62		0.00	7.67	6.10	0.54		25.65		
74	7.60	1563	3.60	4.20	7.20	0.63	15.63	0.00	9.12	5.90	1.08	16.10		1165	1.48
			72.14	51.03	165.60	24.63		0.00	556.32	209.15	51.87		1130		
			1.80	2.10	7.20	0.63		0.00	9.12	5.90	0.54		27.29		
75	7.50	1573	3.40	4.50	6.37	0.61	14.88	0.00	9.12	5.00	1.16	15.28		1100	1.33
			68.13	54.67	146.51	23.85		0.00	556.32	177.25	55.71		1082		
			1.70	2.25	6.37	0.61		0.00	9.12	5.00	0.58		25.63		

...Cuadro 29

No.	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	$\Sigma$	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	$\Sigma$	mg L <sup>-1</sup>	RSE	%ERROR
			mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>							mmol L <sup>-1</sup>			mg L <sup>-1</sup>		
76	7.70	2030	3.20	2.30	13.69	0.52	19.71	0.00	10.44	8.50	1.46	20.40		1472	1.72
			64.12	27.94	314.87	20.33	0.00	636.84	301.32	70.12	1435				
			1.60	1.15	13.69	0.52	0.00	10.44	8.50	0.73	36.63				
77	7.30	1504	3.40	3.80	7.52	0.63	15.35	0.00	9.95	4.80	1.06	15.81		1172	1.48
			68.13	46.17	172.96	24.63	0.00	606.95	170.16	50.91	1139				
			1.70	1.90	7.52	0.63	0.00	9.95	4.80	0.53	27.03				
78	7.40	1526	3.90	4.10	6.30	0.66	14.96	0.00	9.35	5.10	1.03	15.48		1137	1.71
			78.15	49.81	144.90	25.80	0.00	570.35	180.79	49.47	1099				
			1.95	2.05	6.30	0.66	0.00	9.35	5.10	0.51	25.92				
79	7.70	1568	3.40	4.20	7.00	0.62	15.22	0.00	9.93	4.70	1.12	15.75		1159	1.71
			68.13	51.03	161.00	24.24	0.00	605.73	166.61	53.79	1130				
			1.70	2.10	7.00	0.62	0.00	9.93	4.70	0.56	26.61				
80	7.10	1542	3.90	4.20	5.68	0.63	14.41	0.00	9.35	4.50	1.06	14.91		1093	1.71
			78.15	51.03	130.64	24.63	0.00	570.35	159.52	50.91	1065				
			1.95	2.10	5.68	0.63	0.00	9.35	4.50	0.53	24.74				
81	7.50	1550	3.50	4.50	7.02	0.64	15.66	0.00	9.00	6.00	1.05	16.05		1162	1.23
			70.14	54.67	161.46	25.02	0.00	549.00	212.70	50.43	1123				
			1.75	2.25	7.02	0.64	0.00	9.00	6.00	0.52	27.18				
82	7.80	1493	3.10	3.80	6.98	0.62	14.50	0.00	8.49	5.25	1.11	14.85		1075	1.19
			62.12	46.17	160.54	24.24	0.00	517.89	186112.00	53.31	1050				
			1.55	1.90	6.98	0.62	0.00	8.49	5.25	0.55	25.34				
83	7.10	1165	2.50	2.50	5.27	0.62	10.89	0.00	6.00	4.25	1.05	11.30		815	1.85
			50.10	30.37	121.21	24.24	0.00	366.00	150.66	50.43	793				
			1.25	1.25	5.27	0.62	0.00	6.00	4.25	0.52	19.16				
84	7.00	1532	4.00	3.90	6.34	0.63	14.87	0.00	9.44	4.90	1.01	15.35		1127	1.59
			80.16	47.38	145.82	24.63	0.00	575.84	173.70	48.51	1096				
			2.00	1.95	6.34	0.63	0.00	9.44	4.90	0.50	25.76				
85	7.90	1049	2.80	2.10	4.52	0.48	9.90	0.00	6.16	3.30	0.84	10.30		757	1.98
			56.11	25.51	103.96	18.76	0.00	375.76	116.98	40.34	737				
			1.40	1.05	4.52	0.48	0.00	6.16	3.30	0.42	17.33				
86	7.10	1522	3.50	4.30	5.89	0.67	14.36	0.00	9.32	4.00	1.40	14.72		1090	1.24
			70.14	52.24	135.47	26.19	0.00	568.52	141.80	67.24	1061				
			1.75	2.15	5.89	0.67	0.00	9.32	4.00	0.70	24.48				
87	7.00	1494	3.20	4.40	5.75	0.61	13.96	0.00	9.15	4.10	1.10	14.35		1058	1.38
			64.12	53.46	132.25	23.85	0.00	558.15	145.34	52.83	1030				
			1.60	2.20	5.75	0.61	0.00	9.15	4.10	0.55	23.96				
88	7.60	1533	3.80	4.10	6.08	0.62	14.60	0.00	9.20	4.85	1.07	15.12		1105	1.75
			76.15	49.81	139.84	24.24	0.00	561.20	171.93	51.39	1074				
			1.90	2.05	6.08	0.62	0.00	9.20	4.85	0.53	25.23				
89	8.00	1443	2.80	4.10	6.43	0.68	14.01	0.00	7.90	5.00	1.53	14.43		1041	1.48
			56.11	49.81	147.89	26.58	0.00	481.90	177.25	73.48	1013				
			1.40	2.05	6.43	0.68	0.00	7.90	5.00	0.76	24.22				
90	7.40	1543	4.00	4.10	6.40	0.63	15.13	0.00	9.52	4.95	1.11	15.58		1142	1.47
			80.16	49.81	147.20	24.63	0.00	580.72	175.47	53.31	1111				
			2.00	2.05	6.40	0.63	0.00	9.52	4.95	0.55	26.10				



...Cuadro 29

No.	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	$\Sigma$	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	$\Sigma$	mg L <sup>-1</sup>	RSE mg L <sup>-1</sup>	%ERROR
			mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>							mmol L <sup>-1</sup>					
91	6.70	1675	4.30	3.40	7.70	0.71	16.11	0.00	7.30	7.30	1.96	16.56		1171	1.38
			86.17	41.31	177.10	27.76		0.00	445.30	258.78	94.13		1130		
			2.15	1.70	7.70	0.71		0.00	7.30	7.30	0.98		27.84		
92	6.50	1875	2.50	3.80	10.68	0.71	17.69	0.00	9.04	7.20	1.98	18.22		1305	1.48
			50.10	46.17	245.64	27.76		0.00	551.44	255.24	95.09		1271		
			1.25	1.90	10.68	0.71		0.00	9.04	7.20	0.99		31.77		
93	7.10	1536	3.30	4.30	7.08	0.68	15.36	0.00	8.84	5.50	1.44	15.78		1143	1.35
			66.13	52.24	162.84	26.58		0.00	539.24	194.97	69.16		1111		
			1.65	2.15	7.08	0.68		0.00	8.84	5.50	0.72		26.62		
94	7.70	953	1.90	2.30	4.35	0.27	8.82	0.00	4.79	3.25	1.00	9.04		651	1.23
			38.07	27.94	100.05	10.55		0.00	292.19	115.21	48.03		632		
			0.95	1.15	4.35	0.27		0.00	4.79	3.25	0.50		15.26		
95	7.60	648	2.10	2.00	1.79	0.22	6.11	0.00	3.93	1.65	0.70	6.28		461	1.37
			42.08	24.30	41.17	8.60		0.00	239.73	58.49	33.62		447		
			1.05	1.00	1.79	0.22		0.00	3.93	1.65	0.35		9.99		
96	7.60	612	2.00	1.00	2.65	0.23	5.88	0.00	3.56	1.80	0.67	6.03		447	1.26
			40.08	12.15	60.95	8.99		0.00	217.16	63.81	32.18		435		
			1.00	0.50	2.65	0.23		0.00	3.56	1.80	0.33		10.07		
97	7.60	1647	1.80	4.10	9.33	0.61	15.84	0.00	7.56	5.95	2.73	16.24		1156	1.25
			36.07	49.81	214.59	23.85		0.00	461.16	210.92	131.12		1127		
			0.90	2.05	9.33	0.61		0.00	7.56	5.95	1.36		27.76		
98	7.70	661	1.70	1.30	2.99	0.25	6.24	0.00	3.38	2.25	0.83	6.46		465	1.73
			34.06	15.79	68.77	9.77		0.00	206.18	79.76	39.86		454		
			0.85	0.65	2.99	0.25		0.00	3.38	2.25	0.41		10.78		
99	7.70	1576	3.30	3.60	7.77	0.63	15.30	0.00	6.58	6.00	2.18	14.76		1059	1.80
			66.13	43.74	178.71	24.63		0.00	401.38	212.70	104.70		1031		
			1.65	1.80	7.77	0.63		0.00	6.58	6.00	1.09		25.52		
100	8.10	1284	3.40	2.60	5.31	0.58	11.89	0.00	5.02	5.05	1.52	11.59		825	1.28
			68.13	31.59	122.13	22.67		0.00	306.22	179.02	73.00		802		
			1.70	1.30	5.31	0.58		0.00	5.02	5.05	0.76		19.72		
MEDIANA	7.30	1561	2.20	3.20	7.73	0.63	15.26	0.00	9.02	5.02	1.05	15.53		1146	1.37
			44.08	38.88	177.90	24.63		0.00	550.52	178.13	50.67		1113		
			1.10	1.60	7.73	0.63		0.00	9.02	5.02	0.52		26.85		
MEDIA	7.28	1580	2.52	3.15	8.89	0.69	15.26	0.00	9.05	5.36	1.10	15.53		1143	1.46
			50.64	38.29	204.50	26.96		0.00	552.58	190.24	53.11		1115		
			1.26	1.57	8.89	0.69		0.00	9.05	5.36	0.55		27.39		
MODA	7.00	1670	2.10	3.80	5.85	0.59	14.11	0.00	12.67	5.00	1.17	20.67		1075	1.43
			42.08	46.17	134.55	23.06		0.00	772.87	177.25	56.19		1130		
			1.05	1.90	5.85	0.59		0.00	12.67	5.00	0.58		18.04		
DESV. EST.	0.32	450	0.92	0.91	3.67	0.22	4.33	0.00	2.97	1.75	0.41	4.45		335	0.26
			18.44	11.09	84.48	8.70		0.00	181.41	62.35	19.72		326.72		
			0.46	0.45	3.67	0.22		0.00	2.97	1.75	0.20		8.40		

Cuadro 30 Composición iónica de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2.

No.	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	$\Sigma$	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	$\Sigma$	mg L <sup>-1</sup>	RSE mg L <sup>-1</sup>	%ERROR
			mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>							mmol L <sup>-1</sup>					
01	7.70	135	0.60	0.40	0.31	0.01	1.32	0.00	0.96	0.20	0.21	1.37		103	1.86
			12.02	4.86	7.13	0.39		0.00	58.56	7.09	10.08		100		
			0.30	0.20	0.31	0.01		0.00	0.96	0.20	0.10		2.08		
02	7.30	2022	2.00	3.00	13.42	1.11	19.53	0.00	12.81	6.20	1.20	20.21		1539	1.71
			40.08	36.45	308.66	43.40		0.00	781.41	219.79	57.63		1487		
			1.00	1.50	13.42	1.11		0.00	12.81	6.20	0.60		36.64		
03	7.00	4612	3.00	4.30	34.79	1.83	43.92	0.00	22.91	6.80	13.23	42.94		3372	1.13
			60.12	52.24	800.17	71.55		0.00	1397.51	241.06	635.43		3258		
			1.50	2.15	34.79	1.83		0.00	22.91	6.80	6.61		76.59		
04	8.10	822	1.40	1.20	4.81	0.45	7.86	0.00	5.26	2.50	0.35	8.11		611	1.57
			28.05	14.58	110.63	17.59		0.00	320.86	88.62	16.81		597		
			0.70	0.60	4.81	0.45		0.00	5.26	2.50	0.17		14.49		
05	7.20	2005	2.00	3.20	13.55	1.10	19.85	0.00	11.78	6.00	1.37	19.15		1446	1.79
			40.08	38.88	311.65	43.01		0.00	718.58	212.70	65.80		1430		
			1.00	1.60	13.55	1.10		0.00	11.78	6.00	0.68		35.71		
06	8.10	462	0.80	0.40	2.98	0.35	4.53	0.00	2.99	1.40	0.26	4.65		357	1.31
			16.03	4.86	68.54	13.68		0.00	182.39	49.63	12.48		347		
			0.40	0.20	2.98	0.35		0.00	2.99	1.40	0.13		8.45		
07	7.10	1991	2.00	3.00	13.12	1.02	19.14	0.00	12.80	5.80	1.03	19.63		1469	1.26
			40.08	36.45	301.76	39.88		0.00	780.80	205.61	49.47		1454		
			1.00	1.50	13.12	1.02		0.00	12.80	5.80	0.51		35.75		
08	7.50	1943	2.30	2.90	13.34	1.08	19.62	0.00	13.28	5.90	0.92	20.10		1530	1.21
			46.09	35.23	306.82	42.22		0.00	810.08	209.15	44.18		1493		
			1.15	1.45	13.34	1.08		0.00	13.28	5.90	0.46		36.66		
09	7.50	2018	2.00	3.10	13.77	1.11	19.98	0.00	12.23	6.40	0.88	19.51		1497	1.19
			40.08	37.66	316.71	43.40		0.00	746.03	226.88	42.26		1453		
			1.00	1.55	13.77	1.11		0.00	12.23	6.40	0.44		36.50		
10	7.60	1950	2.40	2.80	12.10	1.16	18.46	0.00	12.33	5.90	0.74	18.97		1442	1.36
			48.09	34.02	278.30	45.35		0.00	752.13	209.15	35.54		1402		
			1.20	1.40	12.10	1.16		0.00	12.33	5.90	0.37		34.46		
11	7.80	1980	2.20	3.30	11.90	1.14	18.54	0.00	12.05	6.20	0.89	19.14		1443	1.59
			44.08	40.09	273.70	44.57		0.00	735.05	219.79	42.74		1400		
			1.10	1.65	11.90	1.14		0.00	12.05	6.20	0.44		34.48		
12	7.60	1897	2.40	3.00	11.73	1.11	18.24	0.00	11.90	6.00	0.95	18.85		1415	1.64
			48.09	36.45	269.79	43.40		0.00	725.90	212.70	45.62		1381		
			1.20	1.50	11.73	1.11		0.00	11.90	6.00	0.47		33.91		
13	7.60	2001	2.60	3.20	12.31	1.13	19.24	0.00	12.30	6.60	1.02	19.92		1486	1.74
			52.10	38.88	283.13	44.18		0.00	750.30	233.97	48.99		1451		
			1.30	1.60	12.31	1.13		0.00	12.30	6.60	0.51		35.75		
14	7.50	2050	2.60	3.20	12.54	1.18	19.52	0.00	12.78	6.40	0.82	20.00		1509	1.21
			52.10	38.88	288.42	46.13		0.00	779.58	226.88	39.38		1471		
			1.30	1.60	12.54	1.18		0.00	12.78	6.40	0.41		36.21		
15	7.60	1990	2.80	3.30	12.06	1.17	19.33	0.00	12.18	6.70	1.07	19.95		1490	1.58
			56.11	40.09	277.38	45.74		0.00	742.98	237.51	51.39		1451		
			1.40	1.65	12.06	1.17		0.00	12.18	6.70	0.53		35.69		
16	7.70	2004	2.20	4.30	11.49	1.10	19.09	0.00	12.38	6.40	0.78	19.56		1459	1.22
			44.08	52.24	264.27	43.01		0.00	755.18	226.88	37.46		1423		
			1.10	2.15	11.49	1.10		0.00	12.38	6.40	0.39		35.01		

...Cuadro 30

No.	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ	mg L <sup>-1</sup>	RSE	%ERROR
			mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>											mmol L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>
17	7.50	1954	2.60	3.80	11.13	1.08	18.61	0.00	11.69	6.60	0.77	19.06		1402	1.19
			52.10	46.17	255.99	42.220		0.00	713.09	233.97	36.98		1380		
			1.30	1.90	11.13	1.08		0.00	11.69	6.60	0.38		34.08		
18	7.70	1997	2.60	3.40	12.28	1.10	19.38	0.00	12.64	6.50	0.72	19.86		1491	1.22
			52.10	41.31	282.44	43.01		0.00	771.04	230.42	34.58		1454		
			1.30	1.70	12.28	1.10		0.00	12.64	6.50	0.36		35.88		
19	7.60	2037	3.80	3.40	11.47	1.10	19.77	0.00	12.22	6.60	1.63	20.45		1518	1.69
			76.15	41.31	263.81	43.01		0.00	745.42	233.97	78.28		1481		
			1.90	1.70	11.47	1.10		0.00	12.22	6.60	0.81		35.80		
20	7.40	2030	3.00	3.50	12.10	1.10	19.70	0.00	11.13	6.40	1.57	19.10		1454	1.55
			60.12	42.52	278.30	43.01		0.00	678.93	226.88	75.40		1405		
			1.50	1.75	12.10	1.10		0.00	11.13	6.40	0.78		34.76		
21	7.30	1366	1.90	2.80	7.52	0.78	13.00	0.00	7.89	4.40	1.14	13.43		991	1.63
			38.07	34.02	172.96	30.49		0.00	481.29	155.98	54.75		967		
			0.95	1.40	7.52	0.78		0.00	7.89	4.40	0.57		23.51		
22	7.30	1478	1.80	2.80	9.24	0.80	14.64	0.00	9.31	4.50	1.15	14.96		1126	1.08
			36.07	34.02	212.52	31.28		0.00	567.91	159.52	55.23		1096		
			0.90	1.40	9.24	0.80		0.00	9.31	4.50	0.57		26.72		
23	7.00	1322	1.80	2.50	7.57	0.72	12.59	0.00	8.09	4.20	0.79	13.08		972	1.91
			36.07	30.37	174.11	28.15		0.00	493.49	148.89	37.94		949		
			0.90	1.25	7.57	0.72		0.00	8.09	4.20	0.39		23.12		
24	6.70	1408	1.60	2.40	9.17	0.77	13.94	0.00	9.03	3.80	0.83	13.66		1058	1.01
			32.06	29.16	210.91	30.10		0.00	550.83	134.71	39.86		1027		
			0.80	1.20	9.17	0.77		0.00	9.03	3.80	0.41		25.18		
25	7.00	1527	2.00	2.60	9.26	0.82	14.68	0.00	9.55	4.60	0.88	15.03		1134	1.18
			40.08	31.59	212.98	32.06		0.00	582.55	163.07	42.26		1104		
			1.00	1.30	9.26	0.82		0.00	9.55	4.60	0.44		26.97		
26	7.40	1427	1.80	2.20	8.88	0.84	13.72	0.00	8.77	4.30	1.18	14.25		1071	1.89
			36.07	26.73	204.24	32.84		0.00	534.97	152.43	56.67		1043		
			0.90	1.10	8.88	0.84		0.00	8.77	4.30	0.59		25.38		
27	7.20	1457	1.60	2.02	9.89	0.81	14.32	0.00	8.92	4.60	1.30	14.82		1124	1.72
			32.06	24.54	227.47	31.67		0.00	544.12	163.07	62.43		1085		
			0.80	1.01	9.89	0.81		0.00	8.92	4.60	0.65		26.68		
28	6.90	1538	2.00	2.60	9.47	0.83	14.90	0.00	9.72	4.70	0.83	15.25		1154	1.16
			40.08	31.59	217.81	32.45		0.00	592.92	166.61	39.86		1121		
			1.00	1.30	9.47	0.83		0.00	9.72	4.70	0.41		27.43		
29	7.10	1583	2.00	2.80	9.91	0.81	15.52	0.00	10.05	4.60	1.29	15.94		1200	1.34
			40.08	34.02	227.93	31.67		0.00	613.05	163.07	61.95		1171		
			1.00	1.40	9.91	0.81		0.00	10.05	4.60	0.64		28.41		
30	7.30	365	1.10	0.90	1.30	0.27	3.57	0.00	3.22	0.40	0.09	3.71		294	1.92
			22.04	10.93	29.90	10.55		0.00	196.42	14.18	4.32		288		
			0.55	0.45	1.30	0.27		0.00	3.22	0.40	0.04		6.23		
31	7.00	1602	2.30	2.50	10.29	0.78	15.87	0.00	10.08	4.90	1.24	16.22		1223	1.09
			46.09	30.37	236.67	30.49		0.00	614.88	173.70	59.55		1191		
			1.15	1.25	10.29	0.78		0.00	10.08	4.90	0.62		29.07		
32	7.40	409	2.00	0.80	1.16	0.01	3.97	0.00	3.23	0.80	0.04	4.07		310	1.24
			40.08	9.72	26.68	0.39		0.00	197.03	28.36	1.92		304		
			1.00	0.40	1.16	0.01		0.00	3.23	0.80	0.02		6.62		

...Cuadro 30

No.	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ	mg L <sup>-1</sup>	RSE	%ERROR
			mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>											mmol L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>
33	7.10	1457	1.50	1.70	10.31	0.76	14.27	0.00	9.22	4.20	1.23	14.65		1123	1.31
			30.06	20.65	237.13	29.71		0.00	562.42	148.89	59.07	1087			
			0.75	0.85	10.31	0.76		0.00	9.22	4.20	0.61	26.70			
34	7.00	1490	2.40	2.30	9.05	0.78	14.53	0.00	9.52	4.20	1.22	14.94		1130	1.39
			48.09	27.94	208.15	30.49		0.00	580.72	148.89	58.59	1102			
			1.20	1.15	9.05	0.78		0.00	9.52	4.20	0.61	26.51			
35	6.90	1365	1.70	2.30	8.33	0.72	13.05	0.00	9.06	3.40	0.92	13.38		1025	1.25
			34.06	27.94	191.59	28.15		0.00	552.66	120.53	44.18	999			
			0.85	1.15	8.33	0.72		0.00	9.06	3.40	0.46	23.97			
36	7.00	1862	2.10	2.50	12.14	0.85	17.59	0.00	12.31	4.20	1.53	18.04		1396	1.26
			42.08	30.37	279.22	33.23		0.00	750.91	148.89	73.48	1358			
			1.05	1.25	12.14	0.85		0.00	12.31	4.20	0.76	32.56			
37	6.60	1538	2.00	2.60	9.46	0.87	14.93	0.00	9.92	4.60	0.93	15.45		1169	1.71
			40.08	31.59	217.58	34.01		0.00	605.12	163.07	44.66	1136			
			1.00	1.30	9.46	0.87		0.00	9.92	4.60	0.46	27.61			
38	6.70	1369	2.80	2.60	7.22	0.61	13.23	0.00	10.47	2.40	0.64	13.51		1061	1.05
			56.11	31.59	166.06	23.85		0.00	638.67	85.08	30.73	1032			
			1.40	1.30	7.22	0.61		0.00	10.47	2.40	0.32	23.72			
39	7.00	1958	3.00	3.20	11.94	0.86	19.00	0.00	12.31	5.60	1.57	19.48		1464	1.25
			60.12	38.88	274.62	33.62		0.00	750.91	198.52	75.40	1432			
			1.50	1.60	11.94	0.86		0.00	12.31	5.60	0.78	34.59			
40	7.00	1572	2.60	3.40	8.57	0.84	15.41	0.00	8.93	4.70	1.39	15.02		1130	1.28
			52.10	41.31	197.11	32.84		0.00	544.73	166.61	66.76	1101			
			1.30	1.70	8.57	0.84		0.00	8.93	4.70	0.69	26.73			
41	6.90	1547	2.00	2.08	10.15	0.79	15.02	0.00	9.70	4.60	1.06	15.36		1167	1.12
			40.08	25.27	233.45	30.88		0.00	591.70	163.07	50.91	1135			
			1.00	1.04	10.15	0.79		0.00	9.70	4.60	0.53	27.81			
42	7.90	987	2.00	2.10	4.88	0.56	9.54	0.00	5.27	2.70	1.33	9.30		690	1.27
			40.08	25.51	112.24	21.89		0.00	321.47	95.71	63.87	680			
			1.00	1.05	4.88	0.56		0.00	5.27	2.70	0.66	16.12			
43	7.20	1855	2.10	3.40	11.75	0.82	18.07	0.00	12.51	4.20	1.86	18.57		1425	1.36
			42.08	41.31	270.25	32.06		0.00	763.11	148.89	89.33	1387			
			1.05	1.70	11.75	0.82		0.00	12.51	4.20	0.93	32.96			
44	7.00	1817	2.20	2.80	11.85	0.76	17.61	0.00	12.69	4.00	1.36	18.05		1403	1.23
			44.08	34.02	272.55	29.71		0.00	774.09	141.80	65.32	1361			
			1.10	1.40	11.85	0.76		0.00	12.69	4.00	0.68	32.48			
45	7.10	1413	2.30	2.50	8.22	0.76	13.78	0.00	8.85	4.20	1.24	14.29		1073	1.82
			46.09	30.37	189.06	29.71		0.00	539.85	148.89	59.55	1043			
			1.15	1.25	8.22	0.76		0.00	8.85	4.20	0.62	25.05			
46	7.10	1811	2.60	2.30	12.07	0.79	17.76	0.00	12.40	4.00	1.84	18.24		1409	1.33
			52.10	27.94	277.61	30.88		0.00	756.40	141.80	88.37	1375			
			1.30	1.15	12.07	0.79		0.00	12.40	4.00	0.92	32.63			
47	7.00	1418	2.40	2.30	8.25	0.75	13.70	0.00	9.18	3.80	1.07	14.05		1069	1.26
			48.09	27.94	189.75	29.32		0.00	559.98	134.71	51.39	1041			
			1.20	1.15	8.25	0.75		0.00	9.18	3.80	0.53	24.86			
48	7.40	931	2.00	2.00	4.65	0.57	9.22	0.00	6.05	2.70	0.69	9.44		711	1.18
			40.08	24.30	106.95	22.28		0.00	369.05	95.71	33.14	691			
			1.00	1.00	4.65	0.57		0.00	6.05	2.70	0.34	16.31			

...Cuadro 30

No.	pH	CE μS cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ	mg L <sup>-1</sup>	RSE	%ERROR
			mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>											mmol L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>
49	6.50	1767	2.40	2.20	11.89	0.74	17.23	0.00	13.02	3.60	1.22	17.84		1396	1.74
			48.09	26.73	273.47	28.93		0.00	794.22	127.62	58.59		1357		
			1.20	1.10	11.89	0.74		0.00	13.02	3.60	0.61		32.16		
50	7.20	1619	2.00	3.10	10.09	0.68	15.87	0.00	11.85	3.40	0.95	16.20		1270	1.03
			40.08	37.66	232.07	26.58		0.00	722.85	120.53	45.62		1225		
			1.00	1.55	10.09	0.68		0.00	11.85	3.40	0.47		29.04		
51	7.20	1536	2.40	3.00	9.13	0.67	15.20	0.00	11.22	3.60	0.90	15.72		1198	1.68
			48.09	36.45	209.99	26.19		0.00	684.42	127.62	43.22		1175		
			1.20	1.50	9.13	0.67		0.00	11.22	3.60	0.45		27.77		
52	7.20	1598	2.80	2.40	9.64	0.67	15.51	0.00	11.38	3.60	0.88	15.86		1226	1.12
			56.11	29.16	221.72	26.19		0.00	694.18	127.62	42.26		1197		
			1.40	1.20	9.64	0.67		0.00	11.38	3.60	0.44		28.33		
53	7.10	1252	2.40	2.80	6.24	0.72	12.16	0.00	8.08	3.60	0.78	12.46		935	1.22
			48.09	34.02	143.52	28.15		0.00	492.88	127.62	37.46		911		
			1.20	1.40	6.24	0.72		0.00	8.08	3.60	0.39		21.63		
54	7.30	430	1.43	2.16	0.61	0.03	4.23	0.00	3.24	0.40	0.49	4.13		316	1.20
			28.65	26.24	14.03	1.17		0.00	197.64	14.18	23.53		305		
			0.71	1.08	0.61	0.03		0.00	3.24	0.40	0.24		6.32		
55	7.30	1310	2.60	2.60	7.10	0.63	12.93	0.00	8.78	3.50	0.97	13.25		1004	1.22
			52.10	31.59	163.30	24.63		0.00	535.58	124.07	46.58		977		
			1.30	1.30	7.10	0.63		0.00	8.78	3.50	0.48		23.09		
56	6.50	1315	2.60	2.60	6.98	0.65	12.83	0.00	8.23	3.60	0.74	12.57		958	1.02
			52.10	31.59	160.54	25.41		0.00	502.03	127.62	35.54		934		
			1.30	1.30	6.98	0.65		0.00	8.23	3.60	0.37		22.43		
57	7.00	1309	3.00	2.60	6.69	0.67	12.96	0.00	8.94	3.60	0.79	13.33		1004	1.41
			60.12	31.59	153.87	26.19		0.00	545.34	127.62	37.94		982		
			1.50	1.30	6.69	0.67		0.00	8.94	3.60	0.39		23.09		
58	7.30	1606	2.60	2.80	9.44	0.75	15.59	0.00	10.22	4.20	1.72	16.14		1220	1.73
			52.10	34.02	217.12	29.32		0.00	623.42	148.89	82.61		1187		
			1.30	1.40	9.44	0.75		0.00	10.22	4.20	0.86		28.17		
59	7.40	1086	3.80	1.90	4.32	0.52	10.54	0.00	7.71	2.80	0.31	10.82		826	1.31
			76.15	23.08	99.36	20.33		0.00	470.31	99.26	14.88		803		
			1.90	0.95	4.32	0.52		0.00	7.71	2.80	0.15		18.35		
60	6.70	2566	5.00	5.50	12.54	1.63	24.67	0.00	14.40	9.20	1.84	25.44		1875	1.54
			100.20	66.82	288.42	63.73		0.00	878.40	326.14	88.37		1812		
			2.50	2.75	12.54	1.63		0.00	14.40	9.20	0.92		43.94		
61	7.20	1440	2.80	2.60	7.95	0.75	14.10	0.00	7.69	4.30	1.76	13.75		1031	1.26
			56.11	31.59	182.85	29.32		0.00	469.09	152.43	84.53		1005		
			1.40	1.30	7.95	0.75		0.00	7.69	4.30	0.88		24.27		
62	7.70	1300	2.80	2.50	6.65	0.67	12.62	0.00	8.78	3.60	0.65	13.03		987	1.60
			56.11	30.37	152.95	26.19		0.00	535.58	127.62	31.21		960		
			1.40	1.25	6.65	0.67		0.00	8.78	3.60	0.32		22.67		
63	7.00	1580	3.70	3.10	7.83	0.64	15.27	0.00	9.60	4.70	1.35	15.65		1169	1.23
			74.14	37.66	180.09	25.02		0.00	585.60	166.61	64.84		1133		
			1.85	1.55	7.83	0.64		0.00	9.60	4.70	0.67		26.84		
64	7.20	1949	5.00	2.70	10.64	0.67	19.01	0.00	11.26	7.20	1.30	19.76		1446	1.93
			100.20	32.80	244.72	26.19		0.00	686.86	255.24	62.43		1408		
			2.50	1.35	10.64	0.67		0.00	11.26	7.20	0.65		34.27		

...Cuadro 30

No.	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	$\Sigma$	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	$\Sigma$	mg L <sup>-1</sup>	RSE	%ERROR
			mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>							mmol L <sup>-1</sup>			mg L <sup>-1</sup>		
65	6.90	1315	2.70	2.30	7.04	0.70	12.74	0.00	8.45	3.60	1.04	13.09		986	1.36
			54.10	27.94	161.92	27.37		0.00	515.45	127.62	49.95	964			
			1.35	1.15	7.04	0.70		0.00	8.45	3.60	0.52	22.81			
66	7.20	1955	4.70	3.10	10.43	0.66	18.89	0.00	9.51	7.00	1.81	18.32		1333	1.53
			94.18	37.66	239.89	25.80		0.00	580.11	248.15	86.93	1312			
			2.35	1.55	10.43	0.66		0.00	9.51	7.00	0.90	32.40			
67	7.70	1952	3.25	3.50	12.35	0.65	19.75	0.00	12.43	7.20	0.62	20.25		1511	1.25
			65.13	42.52	284.05	25.41		0.00	758.23	255.24	29.77	1460			
			1.62	1.75	12.35	0.65		0.00	12.43	7.20	0.31	36.31			
68	7.50	1933	5.00	3.00	10.29	0.66	18.95	0.00	11.85	7.00	0.58	19.43		1432	1.25
			100.20	36.45	236.67	25.80		0.00	722.85	248.15	27.85	1397			
			2.50	1.50	10.29	0.66		0.00	11.85	7.00	0.29	34.09			
69	7.60	1553	3.80	1.90	8.82	0.53	15.05	0.00	11.02	3.80	0.58	15.40		1190	1.15
			76.15	23.08	202.86	20.72		0.00	672.22	134.71	27.85	1157			
			1.90	0.95	8.82	0.53		0.00	11.02	3.80	0.29	27.31			
70	7.80	1162	2.40	1.60	7.11	0.59	11.70	0.00	7.81	2.90	0.63	11.34		888	1.56
			48.09	19.44	163.53	23.06		0.00	476.41	102.80	30.25	863			
			1.20	0.80	7.11	0.59		0.00	7.81	2.90	0.31	20.72			
71	7.50	898	2.00	2.00	4.15	0.57	8.72	0.00	5.54	2.80	0.63	8.97		667	1.41
			40.08	24.30	95.45	22.28		0.00	337.94	99.26	30.25	649			
			1.00	1.00	4.15	0.57		0.00	5.54	2.80	0.31	15.37			
72	7.00	953	2.00	1.90	4.74	0.61	9.25	0.00	5.67	2.80	0.55	9.02		685	1.26
			40.08	23.08	109.02	23.85		0.00	345.87	99.26	26.41	667			
			1.00	0.95	4.74	0.61		0.00	5.67	2.80	0.27	16.04			
73	7.60	1496	4.30	4.30	5.24	0.67	14.51	0.00	8.90	4.80	1.31	15.01		1087	1.69
			86.17	52.24	120.52	26.19		0.00	542.90	170.16	62.91	1061			
			2.15	2.15	5.24	0.67		0.00	8.90	4.80	0.65	24.56			
74	7.60	2393	3.80	2.40	16.65	0.60	23.45	0.00	14.05	8.20	1.80	24.05		1789	1.26
			76.15	29.16	382.95	23.46		0.00	857.05	290.69	86.45	1745			
			1.90	1.20	16.65	0.60		0.00	14.05	8.20	0.90	43.50			
75	7.20	955	2.30	1.80	4.64	0.58	9.32	0.00	6.30	2.80	0.59	9.69		729	1.95
			46.09	21.87	106.72	22.67		0.00	384.30	99.26	28.33	709			
			1.15	0.90	4.64	0.58		0.00	6.30	2.80	0.29	16.66			
76	7.50	1451	4.20	3.80	5.35	0.71	14.06	0.00	8.55	4.60	1.20	14.35		1040	1.02
			84.16	46.17	123.05	27.76		0.00	521.55	163.07	57.63	1023			
			2.10	1.900	5.35	0.71		0.00	8.55	4.60	0.60	23.81			
77	7.70	1500	4.10	4.10	5.71	0.72	14.63	0.00	9.17	4.80	1.20	15.17		1095	1.81
			82.16	49.81	131.33	28.15		0.00	559.37	170.16	57.63	1078			
			2.05	2.05	5.71	0.72		0.00	9.17	4.80	0.60	25.10			
78	7.90	1463	3.60	3.80	6.33	0.72	14.45	0.00	9.41	4.40	1.17	14.98		1109	1.80
			72.14	46.17	145.59	28.15		0.00	574.01	155.98	56.19	1078			
			1.80	1.90	6.33	0.72		0.00	9.41	4.40	0.58	25.14			
79	7.00	1477	3.35	3.83	6.87	0.71	14.76	0.00	9.37	4.50	1.24	15.11		1128	1.17
			67.13	46.53	158.01	27.76		0.00	571.57	159.52	59.55	1090			
			1.67	1.910	6.87	0.71		0.00	9.37	4.50	0.62	25.66			
80	7.70	1854	4.00	4.00	9.35	0.72	18.07	0.00	12.85	4.80	0.84	18.49		1404	1.15
			80.16	48.60	215.05	28.15		0.00	783.85	170.16	40.34	1366			
			2.00	2.00	9.35	0.72		0.00	12.85	4.80	0.42	32.14			

...Cuadro 30

No.	pH	CE μS cm <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ	mg L <sup>-1</sup>	RSE	%ERROR
			mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>											mmol L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>
81	7.60	2377	2.60	2.80	17.2	0.61	23.21	0.00	13.80	8.10	1.79	23.69		1761	1.02
			52.10	34.02	395.60	23.85		0.00	841.80	287.14	85.97		1720		
			1.30	1.40	17.20	0.61		0.00	13.80	8.10	0.89		43.30		
82	7.90	1992	4.00	4.10	10.74	0.72	19.56	0.00	13.96	4.80	1.50	20.26		1533	1.76
			80.16	49.81	247.02	28.15		0.00	851.56	170.16	72.04		1498		
			2.00	2.05	10.74	0.72		0.00	13.96	4.80	0.75		35.02		
83	7.40	1576	4.00	3.80	6.75	0.72	15.27	0.00	9.35	4.80	1.47	15.62		1156	1.13
			80.16	46.17	155.25	28.15		0.00	570.35	170.16	70.60		1120		
			2.00	1.90	6.75	0.72		0.00	9.35	4.80	0.73		26.25		
84	7.30	1881	4.00	4.20	9.53	0.71	18.44	0.00	12.67	4.80	1.49	18.96		1433	1.39
			80.16	51.03	219.19	27.76		0.00	772.87	170.16	71.56		1392		
			2.00	2.10	9.53	0.71		0.00	12.67	4.80	0.74		32.55		
85	7.80	1500	2.20	2.80	8.97	0.71	14.68	0.00	8.68	5.20	1.30	15.18		1116	1.67
			44.08	34.02	206.31	27.76		0.00	529.48	184.34	62.43		1088		
			1.10	1.40	8.97	0.71		0.00	8.68	5.20	0.65		26.71		
86	7.30	955	2.20	1.80	4.68	0.59	9.27	0.00	6.14	2.80	0.70	9.64		720	1.96
			44.08	21.87	107.64	23.06		0.00	374.54	99.26	33.62		704		
			1.10	0.90	4.68	0.59		0.00	6.14	2.80	0.35		16.56		
87	8.00	1011	2.90	1.50	4.78	0.68	9.86	0.00	5.30	3.60	1.24	10.14		737	1.40
			58.11	18.22	109.94	26.58		0.00	323.30	127.62	59.55		723		
			1.45	0.75	4.78	0.68		0.00	5.30	3.60	0.62		17.18		
88	7.70	2846	3.00	2.80	21.19	1.05	28.04	0.00	14.00	13.00	1.63	28.63		2104	1.04
			60.12	34.02	487.37	41.05		0.00	854.00	460.85	78.28		2015		
			1.50	1.40	21.19	1.05		0.00	14.00	13.00	0.81		52.95		
89	7.80	1480	4.10	4.10	5.32	0.71	14.23	0.00	8.98	4.60	1.16	14.74		1081	1.76
			82.16	49.81	122.36	27.76		0.00	547.78	163.07	55.71		1048		
			2.05	2.05	5.32	0.71		0.00	8.98	4.60	0.58		24.29		
90	7.90	2420	3.00	3.80	15.76	0.89	23.45	0.00	14.99	6.40	2.58	23.97		1820	1.10
			60.12	46.17	362.48	34.79		0.00	914.39	226.88	123.91		1768		
			1.50	1.90	15.76	0.89		0.00	14.99	6.40	1.29		42.73		
91	7.00	1484	4.00	4.00	5.71	0.70	14.41	0.00	9.41	4.40	1.12	14.93		1097	1.77
			80.16	48.60	131.33	27.37		0.00	574.01	155.98	53.79		1071		
			2.00	2.00	5.71	0.70		0.00	9.41	4.40	0.56		24.78		
92	7.40	1821	4.00	4.30	8.83	0.72	17.85	0.00	12.35	4.50	1.40	18.25		1382	1.11
			80.16	52.24	203.09	28.15		0.00	753.35	159.52	67.24		1343		
			2.00	2.15	8.83	0.72		0.00	12.35	4.50	0.70		31.25		
93	7.80	1490	3.80	4.40	5.45	0.68	14.33	0.00	9.01	4.40	1.28	14.69		1081	1.24
			76.15	53.46	125.35	26.58		0.00	549.61	155.98	61.47		1048		
			1.90	2.20	5.45	0.68		0.00	9.01	4.40	0.64		24.28		
94	7.30	1827	4.00	4.20	9.01	0.71	17.92	0.00	12.75	4.60	1.27	18.62		1389	1.92
			80.16	51.03	207.23	27.76		0.00	777.75	163.07	60.99		1367		
			2.00	2.10	9.01	0.71		0.00	12.75	4.60	0.63		31.80		
95	7.60	2132	4.40	3.20	12.33	0.91	20.84	0.00	13.60	7.20	0.69	21.49		1605	1.54
			88.17	38.88	283.59	35.58		0.00	829.60	255.24	33.14		1564		
			2.20	1.60	12.33	0.91		0.00	13.60	7.20	0.34		38.18		
96	7.90	1825	4.10	4.40	8.76	0.72	17.98	0.00	12.77	4.60	1.21	18.58		1403	1.64
			82.16	53.46	201.48	28.15		0.00	778.97	163.07	58.11		1365		
			2.05	2.20	8.76	0.72		0.00	12.77	4.60	0.60		31.70		

...Cuadro 30

No.	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Σ	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Σ	mg L <sup>-1</sup>	RSE	%ERROR
			mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>											mmol L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>
97	7.30	2073	4.40	3.00	11.83	0.90	20.13	0.00	11.86	7.20	1.57	20.63		1495	1.23
			88.17	36.45	272.09	35.19		0.00	723.46	255.24	75.40		1486		
			2.20	1.50	11.83	0.90		0.00	11.86	7.20	0.78		36.27		
98	7.30	605	1.60	1.70	2.38	0.21	5.89	0.00	4.28	1.40	0.39	6.07		458	1.51
			32.06	20.65	54.74	8.21		0.00	261.08	49.63	18.73		445		
			0.80	0.85	2.38	0.21		0.00	4.28	1.40	0.19		10.11		
99	7.30	636	1.60	1.50	2.99	0.21	6.30	0.00	4.60	1.40	0.48	6.48		495	1.41
			32.06	18.22	68.77	8.21		0.00	280.60	49.63	23.05		480		
			0.80	0.75	2.99	0.21		0.00	4.60	1.40	0.24		10.99		
100	7.30	652	1.80	1.80	2.57	0.22	6.39	0.00	4.58	1.50	0.53	6.61		496	1.69
			36.07	21.87	59.11	8.60		0.00	279.38	53.17	25.45		483		
			0.90	0.90	2.57	0.22		0.00	4.58	1.50	0.26		10.93		
101	7.10	1606	4.50	4.00	6.97	0.66	16.13	0.00	8.65	5.30	1.63	15.58		1164	1.73
			90.18	48.60	160.31	25.80		0.00	527.65	187.88	78.28		1118		
			2.25	2.00	6.97	0.66		0.00	8.65	5.30	0.81		26.64		
102	7.50	620	2.60	1.60	1.65	0.25	6.10	0.00	4.11	1.50	0.67	6.28		469	1.45
			52.10	19.44	37.95	9.77		0.00	250.71	53.17	32.18		455		
			1.30	0.80	1.65	0.25		0.00	4.11	1.50	0.33		9.94		
103	7.70	1594	4.30	3.70	6.91	0.64	15.55	0.00	9.38	5.00	1.55	15.93		1167	1.21
			86.17	44.95	158.93	25.02		0.00	572.18	177.25	74.44		1138		
			2.15	1.85	6.91	0.64		0.00	9.38	5.00	0.77		26.70		
104	7.30	901	1.70	2.80	3.97	0.32	8.79	0.00	4.42	3.20	0.91	8.53		615	1.50
			34.06	34.02	91.31	12.51		0.00	269.62	113.44	43.70		598		
			0.85	1.40	3.97	0.32		0.00	4.42	3.20	0.45		14.61		
105	7.30	921	2.60	2.60	3.21	0.33	8.74	0.00	5.61	2.30	1.08	8.99		664	1.41
			52.10	31.59	73.83	12.90		0.00	342.21	81.53	51.87		646		
			1.30	1.30	3.21	0.33		0.00	5.61	2.30	0.54		14.59		
106	7.10	1456	4.20	3.00	6.26	0.60	14.06	0.00	8.38	4.50	1.60	14.48		1065	1.47
			84.16	36.45	143.98	23.46		0.00	511.18	159.52	76.84		1035		
			2.10	1.50	6.26	0.60		0.00	8.38	4.50	0.80		24.14		
MEDIANA	7.30	1538	2.60	2.80	899	0.72	14.97	0.00	9.51	4.50	1.07	15.30		1155	1.35
			52.10	34.02	206.77	28.15		0.00	580.41	159.52	51.63		1119		
			1.30	1.40	8.99	0.72		0.00	9.51	4.50	0.53		26.72		
MEDIA	7.33	1560	2.74	2.82	8.87	0.74	15.18	0.00	9.75	4.55	1.18	15.49		1165	1.41
			55.07	34.32	204.01	28.92		0.00	594.91	161.46	56.96		1135		
			137	1.41	8.87	0.74		0.00	9.75	4.55	0.59		27.29		
MODA	7.30	1457	2.00	2.80	12.10	0.72	14.68	0.00	12.31	4.60	1.24	-		1446	1.26
			40.08	34.02	278.30	28.15		0.00	750.91	163.07	59.55		1454		
			1.00	1.40	12.10	0.72		0.00	12.31	4.60	0.60		35.75		
DESV. EST.	0.34	579	0.98	0.91	4.52	0.28	5.58	0.00	3.26	1.93	1.26	5.62		428	0.26
			19.75	11.14	104.17	11.06		0.00	199.22	68.46	60.55		415.30		
			0.49	0.45	4.52	0.28		0.00	3.26	1.93	0.63		10.32		



### 6.3 Comprobación de la exactitud de los datos analíticos

Con la finalidad de establecer la correspondencia entre los valores de las mediciones experimentales de la conductividad eléctrica de todas las muestras de agua de los distintos sitios de muestreo y referirla con la conductividad eléctrica teórica de cada muestra de agua con sus valores analíticos químicamente determinados se estableció la relación: conductividad eléctrica experimental ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )-conductividad eléctrica teórica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ).

Para determinar la conductividad eléctrica teórica de cada muestra de agua, se procedió de la siguiente forma: Cada ion fue multiplicado por su factor de conductividad eléctrica (por  $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$ ) y su correspondiente suma nos da el valor de conductividad eléctrica teórica. En el Cuadro 31 se tienen los valores teóricos de conductividad eléctrica de cada ion<sup>9</sup>:

Cuadro 31. Factores de conductividad eléctrica de los iones que generalmente se encuentran en las agua naturales.

Ion	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN 25°C ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	
	Por $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$	Por $\text{mg L}^{-1}$
$\text{Ca}^{2+}$	52.0	2.60
$\text{Mg}^{2+}$	46.6	3.82
$\text{Na}^+$	48.9	2.13
$\text{K}^+$	72.0	1.84
$\text{CO}_3^{2-}$	84.6	2.82
$\text{HCO}_3^-$	43.6	0.715
$\text{Cl}^-$	75.9	2.14
$\text{SO}_4^{2-}$	73.9	1.54

Fuente: APHA, 1989

Las relaciones conjuntas de la  $\text{CE}_{\text{teórica}} (\mu\text{S cm}^{-1}) - \text{CE}_{\text{experimental}} (\mu\text{S cm}^{-1}) = 1.04$  en los datos analíticos (Figura 6). El intervalo de aceptación establecido por este método de comprobación de los datos analíticos es de  $0.9 < \text{CE}_{\text{teórica}} / \text{CE}_{\text{experimental}} < 1.1$ , lo cual nos indica que los datos analíticos obtenidos en este trabajo son correctos.

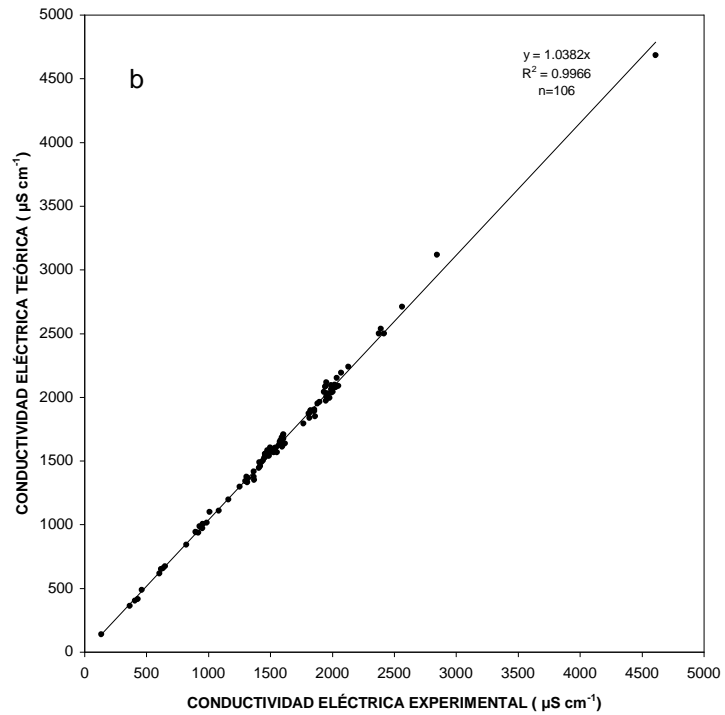
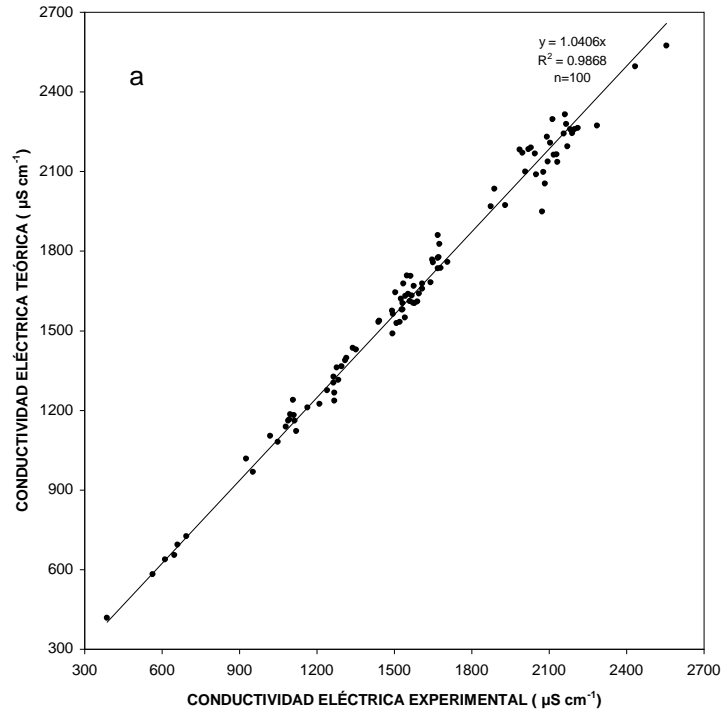


Figura 6. Relación conjunta de la conductividad eléctrica experimental ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y conductividad eléctrica teórica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán. a. Muestreo 1 y b. Muestreo 2.

#### 6.4 Distribución de cationes y aniones

La distribución de los distintos iones de las muestras de agua del Muestreo 1, se muestra en la Figura 7. Esta forma de presentar los iones permite ver con mayor claridad la predominancia de cada ion y como se concentra y distribuye en cada sitio de muestreo a lo largo de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán.

La distribución de cationes en las primeras muestras de agua residual que circulan en El Gran Canal del Valle de México, en la salida de la zona metropolitana en ambos muestreos, el contenido de sodio es muy alto (14.07 y 13.42 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>). El Emisor Norte que vierte sus aguas en La Laguna de Zumpango y en la propia Laguna de Zumpango, el contenido de sodio es de 3.10 y 2.32 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>. A partir de la muestra seis que corresponde al canal cuadrado del distrito de riego de Chiconautla hasta la muestra 40 que corresponde al canal trapezoidal de Xochitlán, el contenido de sodio varió de 14.19 a 7.19 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>. La muestra 42 que pertenece a agua de manantial de la localidad de Chapantongo tiene un contenido de sodio de 1.45 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>. En la muestras 43 del canal La Mora hasta la muestra 60 del sifón de bombeo Gaxthó, el contenido de sodio es alto y medianamente alto, 5.85-11.77 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>. Las muestras de agua 94, 96 y 98 de las Grutas de Tolantongo, Balneario Tzindejé y Balneario Tasquillo, los contenidos de sodio fueron de 4.35, 2.65 y 2.99 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>

En las muestras 18, 23, 66, 77, 93 y 99 del cauce del río Tula, el contenido de sodio fue de: 13.35, 9.34, 6.14, 7.52, 7.08 y 7.77 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> respectivamente. Se destaca que las aguas del río Tula, desde su cauce aguas arriba hasta la afluencia de aguas hacia La Presa Zimapán en su tramo aguas abajo, las sales se diluyen paulatinamente. Las variaciones en los contenidos de sodio y bicarbonato como iones predominantes se deben a que en el trayecto del sistema de riego, la red hidrográfica de Zumpango Ixmiquilpan-Zimapán recibe aguas de manantiales y aguas residuales de todas las poblaciones localizadas en el área de riego del Valle del Mezquital. Estas poblaciones obtienen agua potable de baja concentración de sales de pozos profundos.

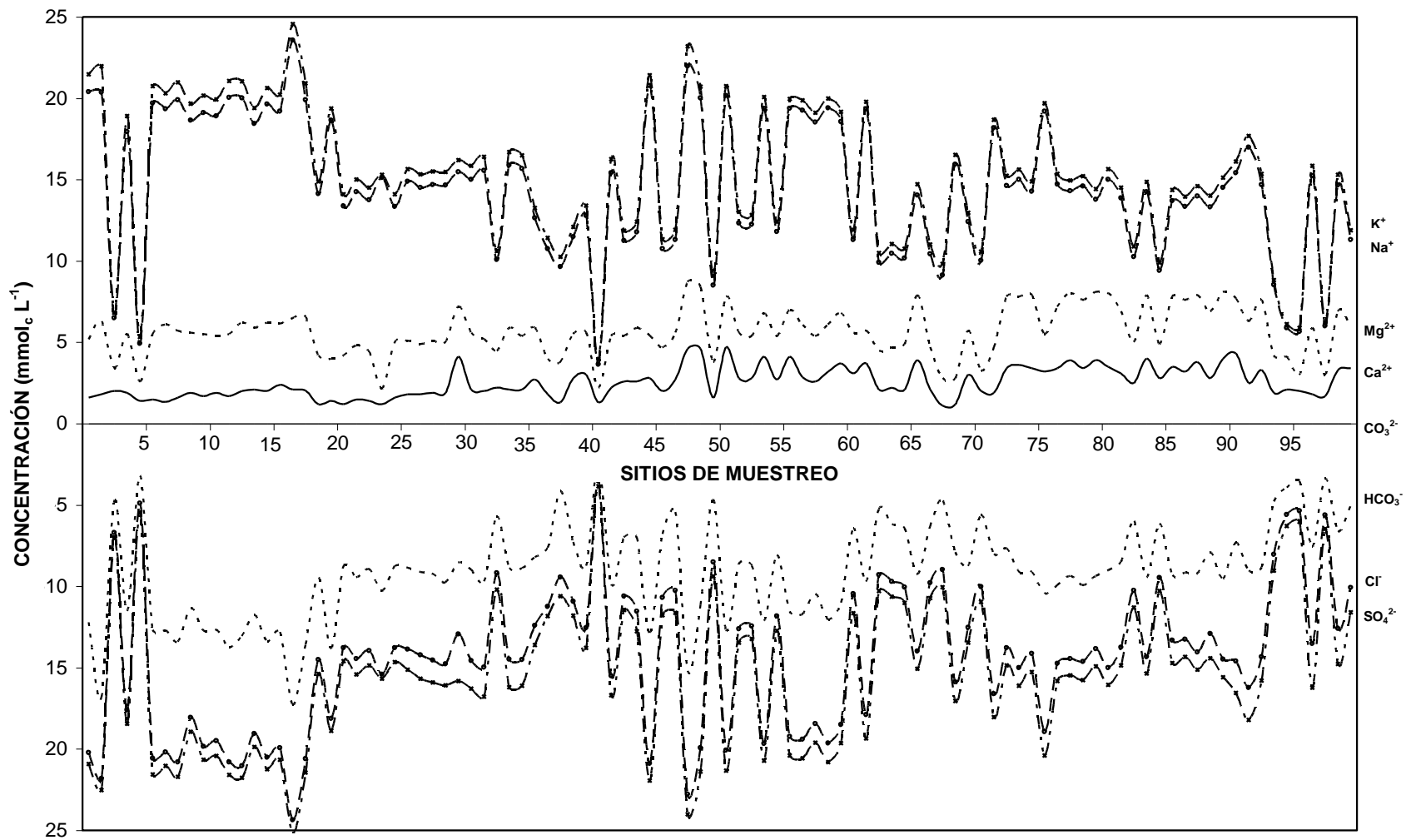
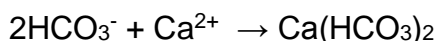


Figura 7. Composición iónica de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1.

La concentración de los distintos iones en las aguas residuales del Muestreo 2, se presenta en la Figura 8. Es necesario hacer notar que, la muestra uno que corresponde al manantial de La Presa San Jerónimo en Los Frailes, Actopan, la concentración de sodio ( $0.31 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ) es muy baja, mientras que en la muestra tres de aguas que derivan de un taller de laminación, la concentración es muy alta ( $34.79 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ). En los sitios de muestreo 5 a 29 la concentración de iones de sodio fluctúa de  $13.55$  a  $9.91 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  y su concentración total electrolítica es de  $2005$  a  $1583 \mu\text{S cm}^{-1}$ . En estas muestras el ion sodio, es predominante. En los aniones, el bicarbonato es el que tiene la mayor concentración ( $11.78$  a  $10.05 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ). Los altos contenidos de bicarbonatos en estas aguas en condiciones de procesos de evapotranspiración, sobre todo en época de sequía, son de esperarse que se precipiten en forma de calcita como sigue<sup>75</sup>:



El contenido de iones cloruro también es alto en éstas muestras ( $6$  a  $4.60 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ). La conductividad de las muestras de agua de Chapantongo y de Cieneguillas son bajas con  $365$  y  $409 \mu\text{S cm}^{-1}$  respectivamente.

El contenido de sodio en los sitios de muestreo del cauce del río Tula, desde las proximidades de la Ciudad de Tula y Presa Endhó, hasta su confluencia con el río San Juan del Río y que forman el embalse de Zimapán, se presentan en el Cuadro 32. El río Tula, cauce principal en la conducción de las aguas residuales en el Valle del Mezquital, nace en el Estado de México y se desplaza en dirección norte hasta Ixmiquilpan donde cambia su curso al noroeste para unirse con el río San Juan del Río, tomando aquí el nombre de río Moctezuma. Al río Tula confluyen los canales que conducen las aguas residuales de la Ciudad de México y a lo largo de su trayectoria se emplean sus flujos para el riego agrícola.

Es importante señalar que el cauce del río Tula es el río receptor de aguas de infiltración que drenan a través de los espesores del suelo, derivados de las excesivas láminas de riego que se aplican a los suelos agrícolas del Valle del Mezquital.

Cuadro 32. Composición del contenido de sodio en los sitios de muestreo del cauce del río Tula que corresponde a los Muestreos 1 y 2.

Sitio	Muestreo 1	Muestreo 2
	Na <sup>+</sup> (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	
Atotonilco de Tula	13.35	11.47
Río Tula	5.57	4.88
Río Tula, Tezontepec	-	7.95
Chilcuautila, río Tula	6.14	5.24
Tlacotalpilco, río Tula	7.52	6.33
Ixmiquilpan, río Tula	7.08	8.76
Cañón El Alberto	-	5.32
Balneáριο Tasquillo, río Tula	-	6.97
Puente Tasquillo, río Tula	7.77	6.91

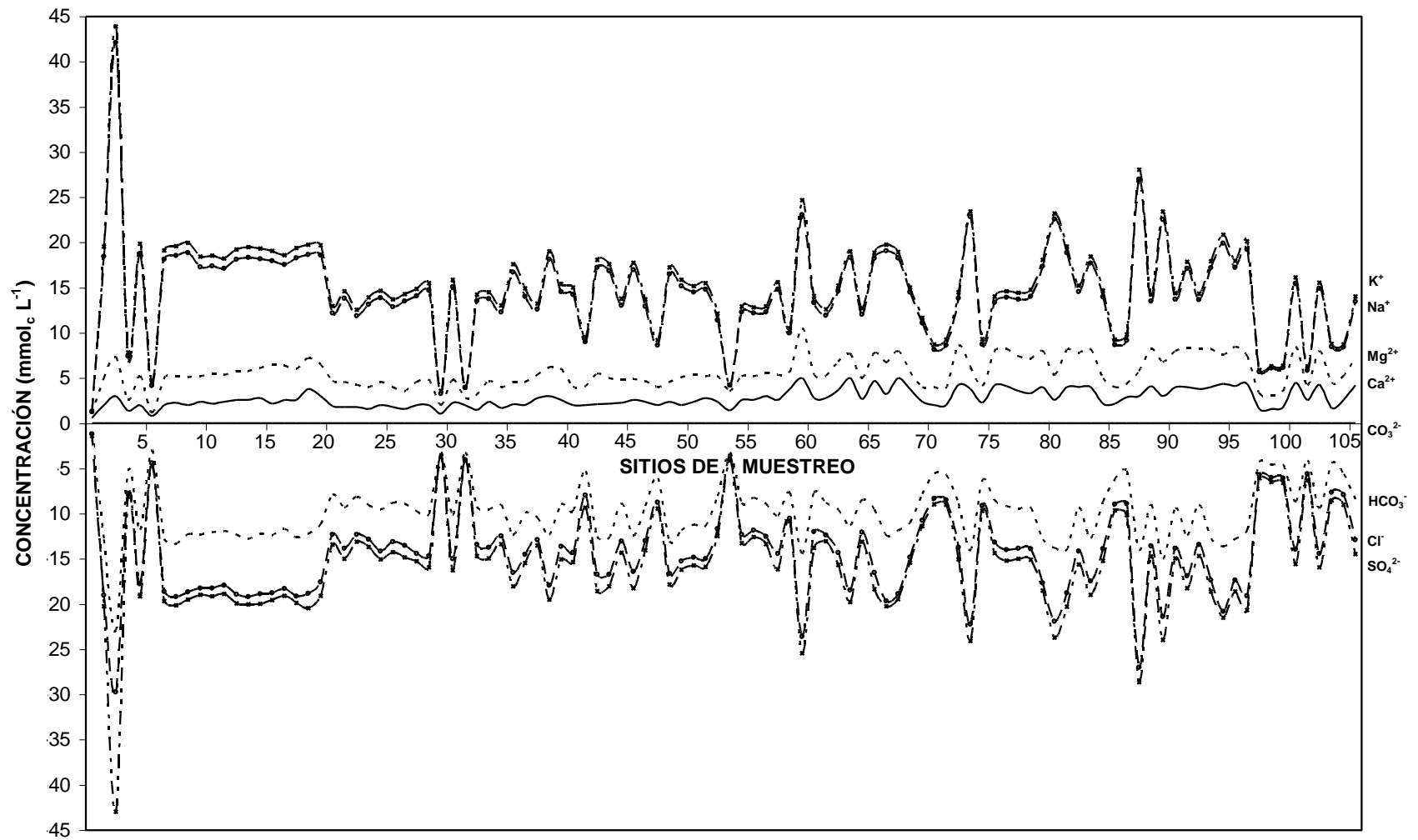


Figura 8. Composición iónica de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2.

## 6.5 Distribución de frecuencias de los datos analíticos

Con la finalidad de conocer la distribución de los valores de conductividad eléctrica, y sólidos totales disueltos, se construyeron los polígonos de frecuencias respectivos que representan los valores porcentuales del número de muestras que se encuentran dentro de un intervalo establecido.

La distribución de frecuencias de la conductividad eléctrica de las aguas residuales se observa en las Figuras 9 y 10. En promedio la mayoría de las aguas residuales en ambos muestreos presenta conductividades entre 700 y 2250, es notable que las muestras con las más bajas concentraciones corresponden a aguas de manantiales, aunque algunas surgen de aguas derivadas de escurrimientos subsuperficiales por los excesos de las láminas de riego, y que fluyen a cierta profundidad gracias al gradiente altitudinal.

El uso de este tipo de aguas se aplica directamente de las corrientes de aguas que circulan por la red hidrográfica, sin ningún tratamiento en algunos municipios del Estado de México e Hidalgo, esto, ha provocado una serie de problemas en los suelos, entre los más comunes tenemos problemas de infiltración del agua en los suelos, provocado por las altas concentraciones de sodio. Como ejemplo de ello tenemos el sitio de muestreo del canal derivado de actividades fabriles La Laminadora que vierte sus desechos directamente al agua, y su concentración de sales ( $4612 \mu\text{S cm}^{-1}$ ) es relativamente alta.

De acuerdo con la distribución de frecuencias del residuo seco evaporado o sólidos totales disueltos ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de ambos muestreos (Figuras 11 y 12) se puede mencionar que un alto porcentaje de muestras tiene concentraciones de sales  $>1000 \text{ mg L}^{-1}$ . Las aguas de baja concentración corresponden a manantiales, mientras que las aguas de alta concentración son establecimientos fabriles. Estas variaciones en las concentraciones de sales, se deben a las aportaciones de aguas residuales de diferente origen a los canales generados de la red hidrográfica.



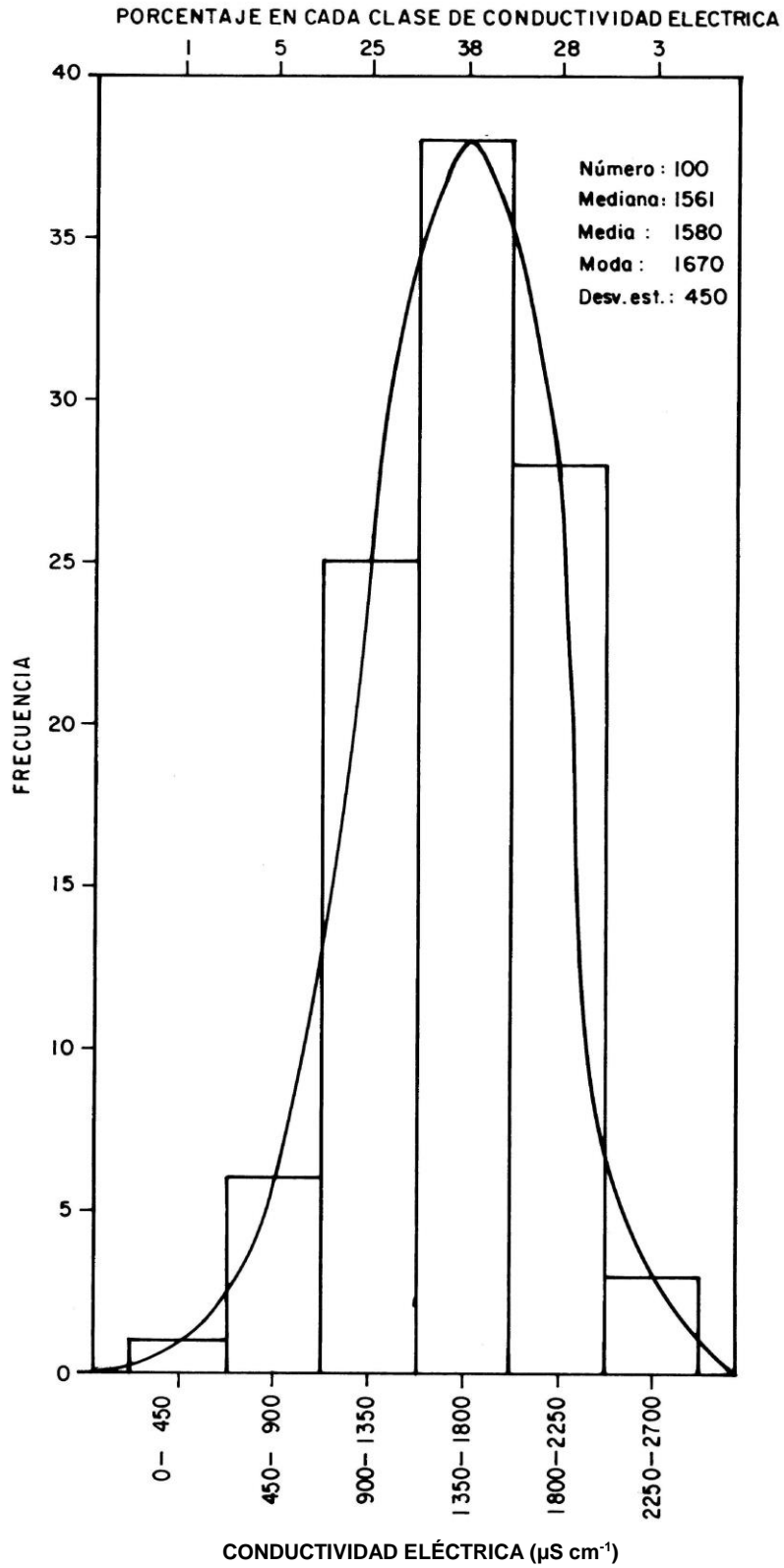


Figura 9. Distribución de frecuencias con respecto a la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1.

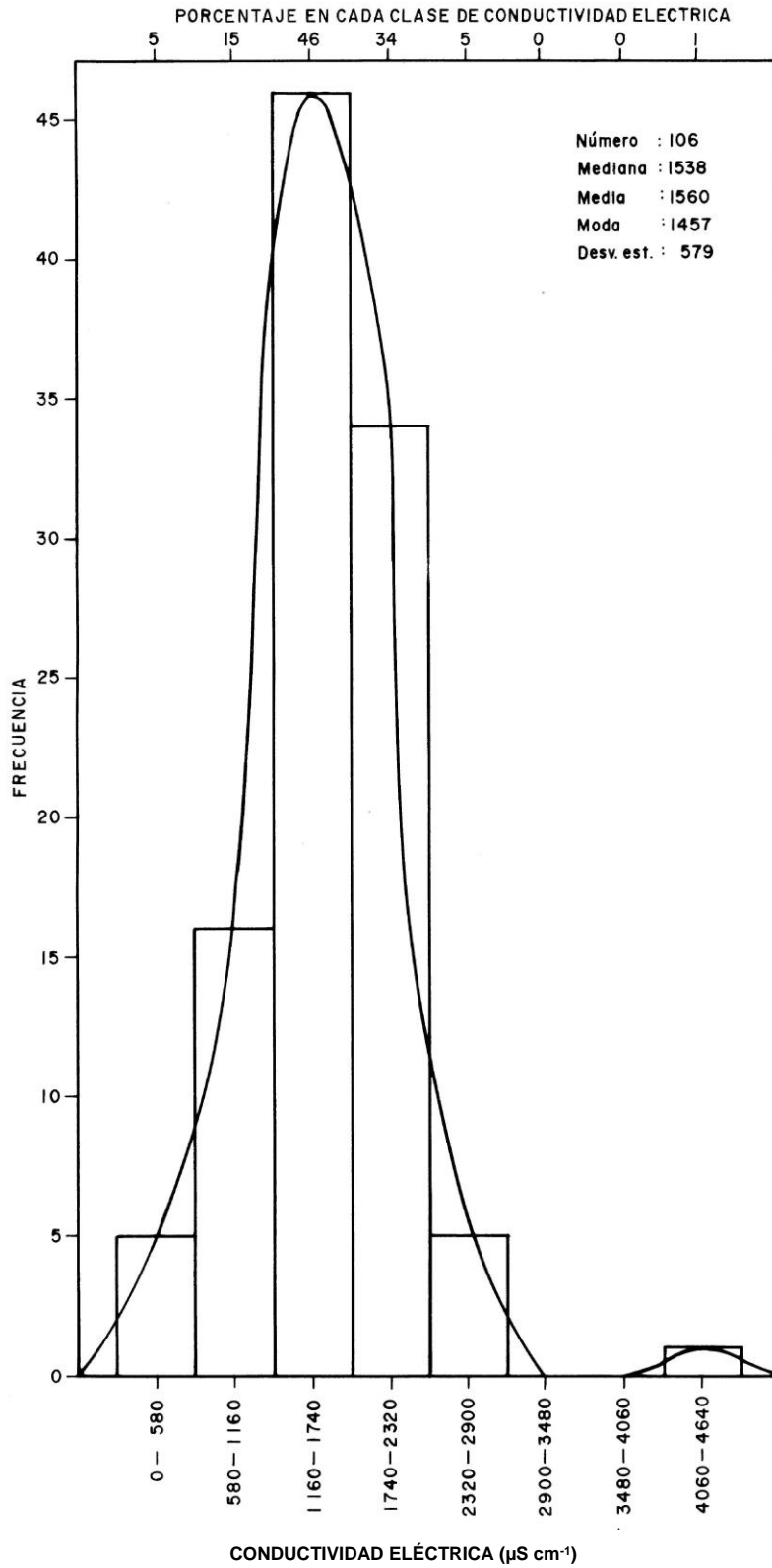


Figura 10. Distribución de frecuencias con respecto a la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2.

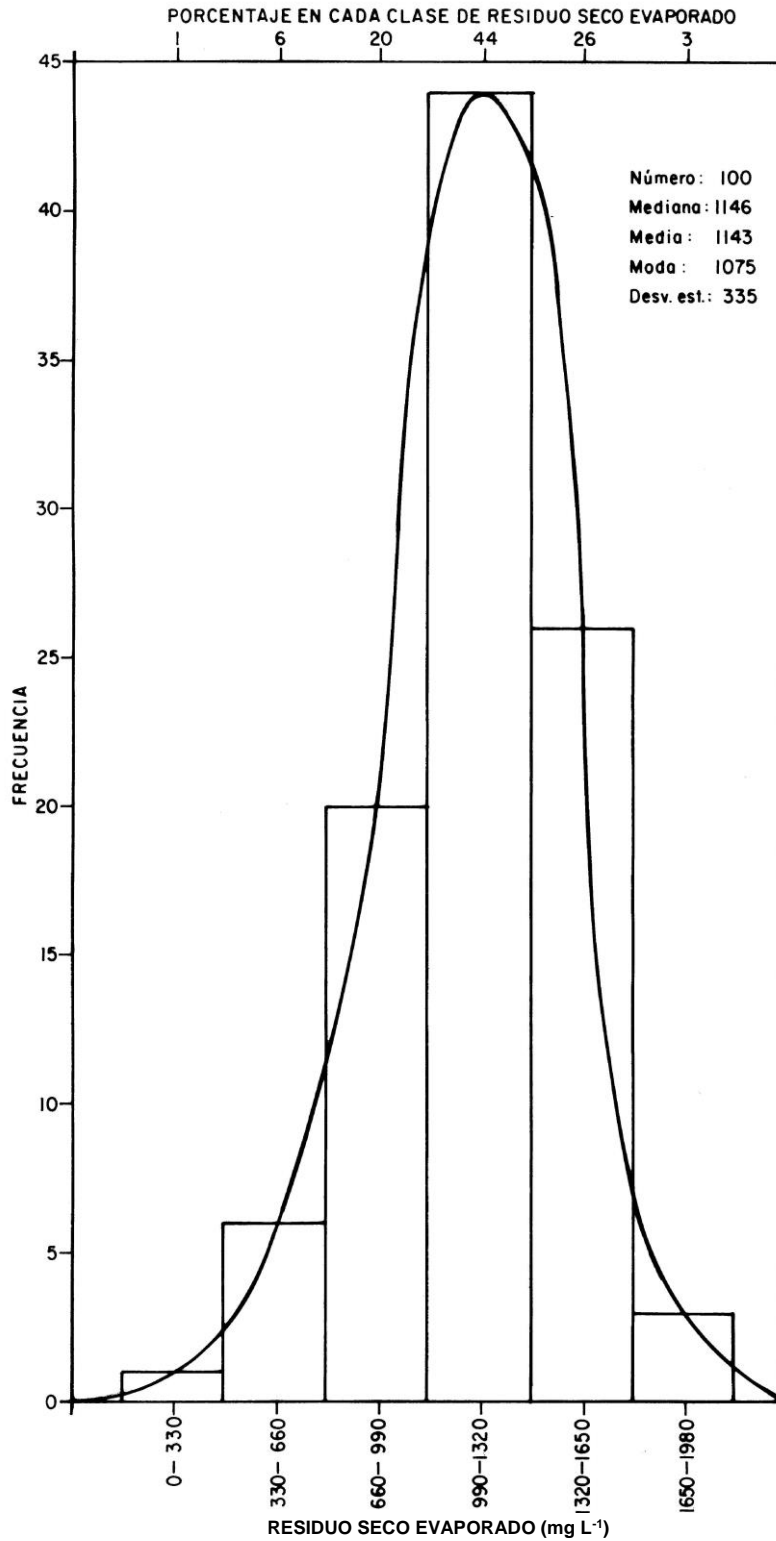


Figura 11. Distribución de frecuencias con respecto al residuo seco evaporado (mg L<sup>-1</sup>) de las aguas residuales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1.

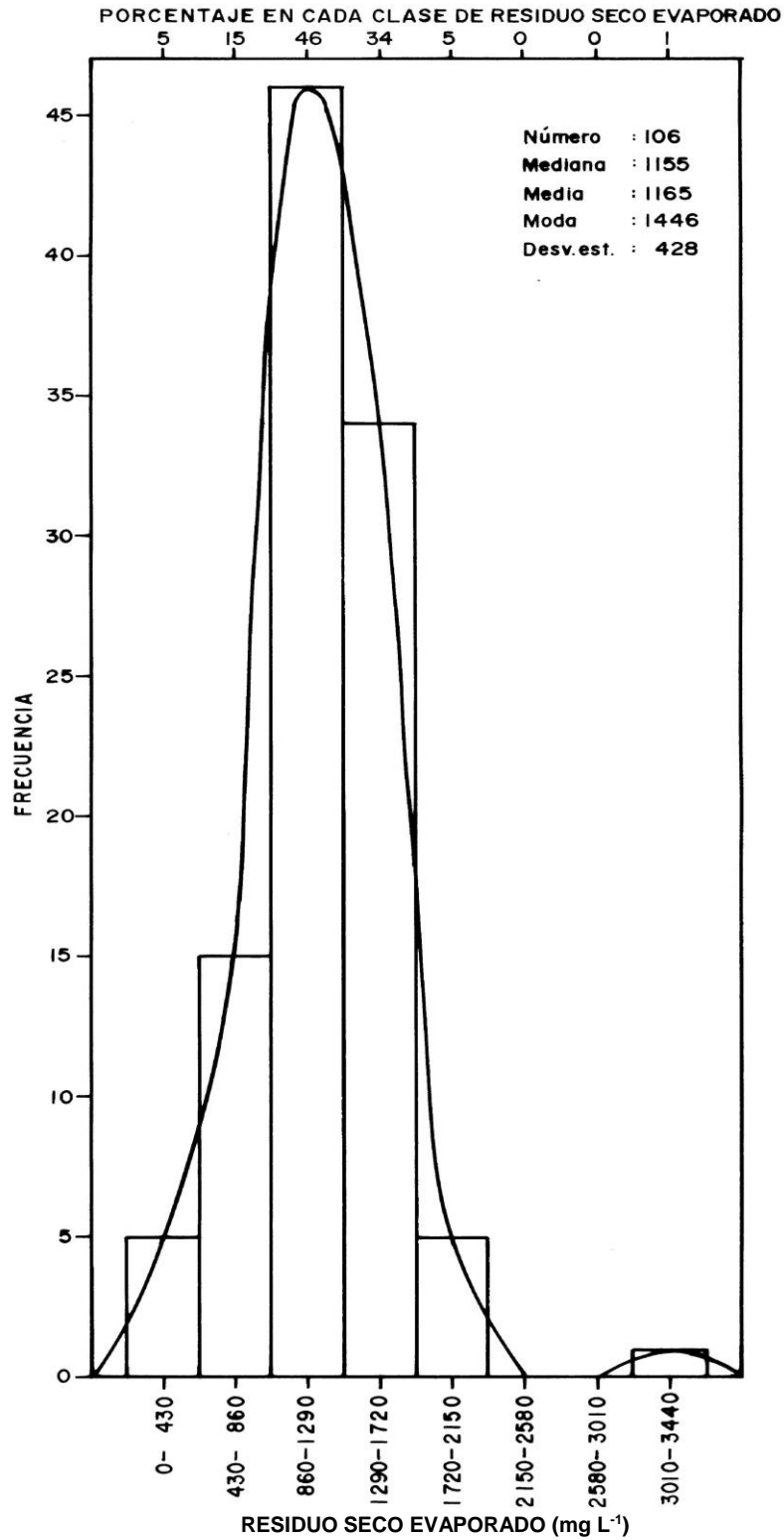


Figura 12. Distribución de frecuencias con respecto al residuo seco evaporado (mg L<sup>-1</sup>) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2.

## 6.6 Clasificación de las aguas residuales con base en la salinidad

### 6.6.1 Conductividad eléctrica

Las mediciones de diferentes parámetros de contenidos de sales solubles en aguas y soluciones acuosas, son directamente proporcionales con respecto a la conductividad eléctrica CE ( $\text{mS cm}^{-1}$ ), sólidos totales disueltos (STD), cationes solubles totales (CST) y aniones solubles totales (AST).

Con fines de mediciones aproximadas de la salinidad en concentraciones bajas se ha utilizado para los sólidos totales disueltos, los valores de la conductividad eléctrica en  $\text{dS m}^{-1}$ ; que se multiplican por un factor de 640; y para concentraciones de salinidad de soluciones hipersalinas la conductividad eléctrica, expresada en  $\text{dS m}^{-1}$ , esta medición se multiplica por 800<sup>66</sup>.

Para obtener la cantidad de cationes solubles totales o total de aniones solubles totales; se multiplica por lo general, por un factor de 10, cuando son expresadas estas concentraciones en  $\text{mmolc L}^{-1}$ . Las mediciones de salinidad en aguas para la conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, cationes solubles totales y aniones solubles totales representan una línea recta, de acuerdo con la ecuación  $y=a(x)$

Para la relación funcional  $\text{mg L}^{-1}=a\text{CE}$  ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) de las aguas residuales en ambos muestreos, el coeficiente de la relación funcional  $\text{mg L}^{-1}=0.7072\text{CE}$  ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) en el Muestreo 1 (Figura 13a) y  $\text{mg L}^{-1}=0.7259\text{CE}$  ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) en el Muestreo 2 (Figura 13b). corresponden a aguas con altos contenidos de iones bicarbonato.

En la práctica experimental y de investigación es muy útil conocer estos coeficientes, ya que en condiciones de campo, cuando se realizan numerosas determinaciones del parámetro de CE, se hace necesario conocer los STD; para este efecto, es necesario multiplicar los valores de la conductividad eléctrica por dicho coeficiente.

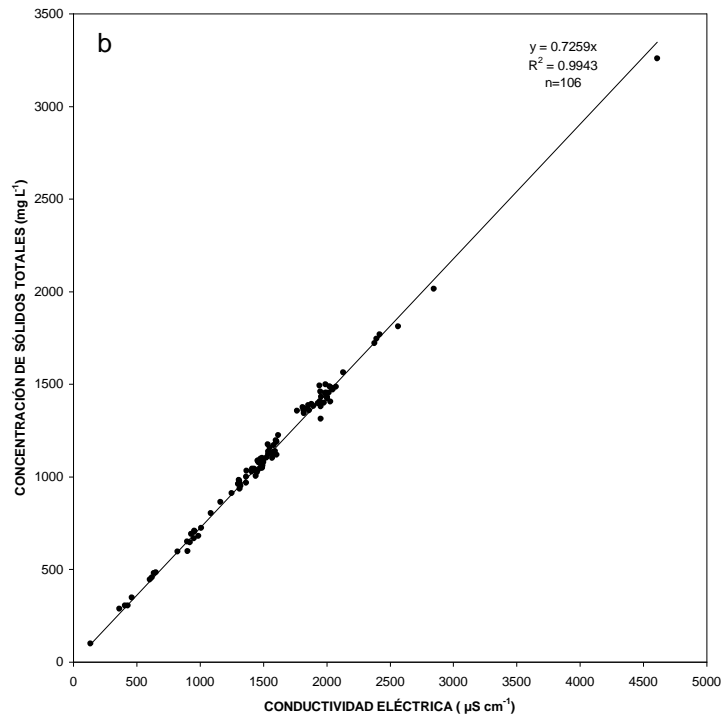
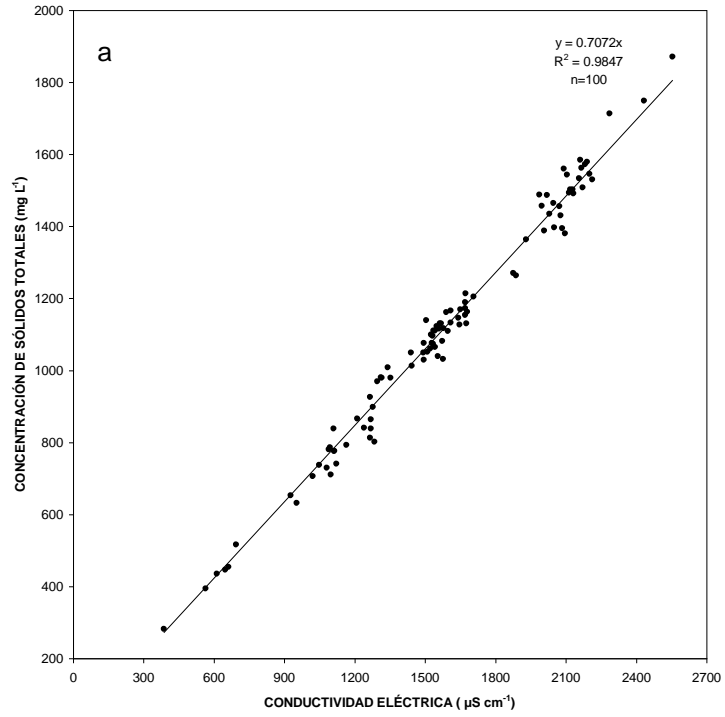


Figura 13. Relación entre la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) y la concentración de sólidos totales ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán. a. Muestreo 1 y b. Muestreo 2.

### 6.6.2 Presión osmótica

Las dependencias de la conductividad eléctrica ( $\text{mS cm}^{-1}$ ) y presión osmótica (MPa); conductividad eléctrica ( $\text{mS cm}^{-1}$ ) y concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ); y concentración de cationes ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) y presión osmótica (MPa), en las aguas residuales para los dos muestreos se presenta en las Figuras 14 y 15.

En el contexto de la respuesta de las plantas a la salinidad, aquí la salinidad se refiere a las concentraciones de sales solubles, de manera que estas concentraciones, aumentan significativamente las propiedades coligativas de las soluciones en las cuales las plantas están expuestas y especialmente entonces, se reduce el potencial osmótico de las soluciones.

El coeficiente (a) en la relación funcional presión osmótica (MPa)= $f$ CE ( $\text{mS cm}^{-1}$ ) tuvo un valor de 0.04 para los dos muestreos. Como las aguas del Valle del Mezquital contienen altas cantidades de iones bicarbonato el coeficiente (a) adquiere un valor de 40 kPa; y si el coeficiente (a) lo expresamos en términos de potencial osmótico, entonces la relación funcional Potencial Osmótico (MPa)= $f$ CE ( $\text{mS cm}^{-1}$ ) se expresa como sigue  $\text{PO} = -40 \text{ CE}$  en donde el potencial osmótico está expresado en kPa y la conductividad eléctrica está expresada en  $\text{mS cm}^{-1}$ .

La relación entre la presión osmótica y la conductividad eléctrica es muy útil en la práctica agrícola. Dentro de la variación de valores de la conductividad eléctrica que permite el desarrollo de las plantas, la relación  $\text{PO} = 0.36 \text{ CE}$  puede usarse de manera muy aproximada para estimar la presión osmótica de las soluciones de los suelos, cuando se conoce la conductividad eléctrica. Para salinidades de tipo sulfáticas el coeficiente 0.36 tiene variaciones.

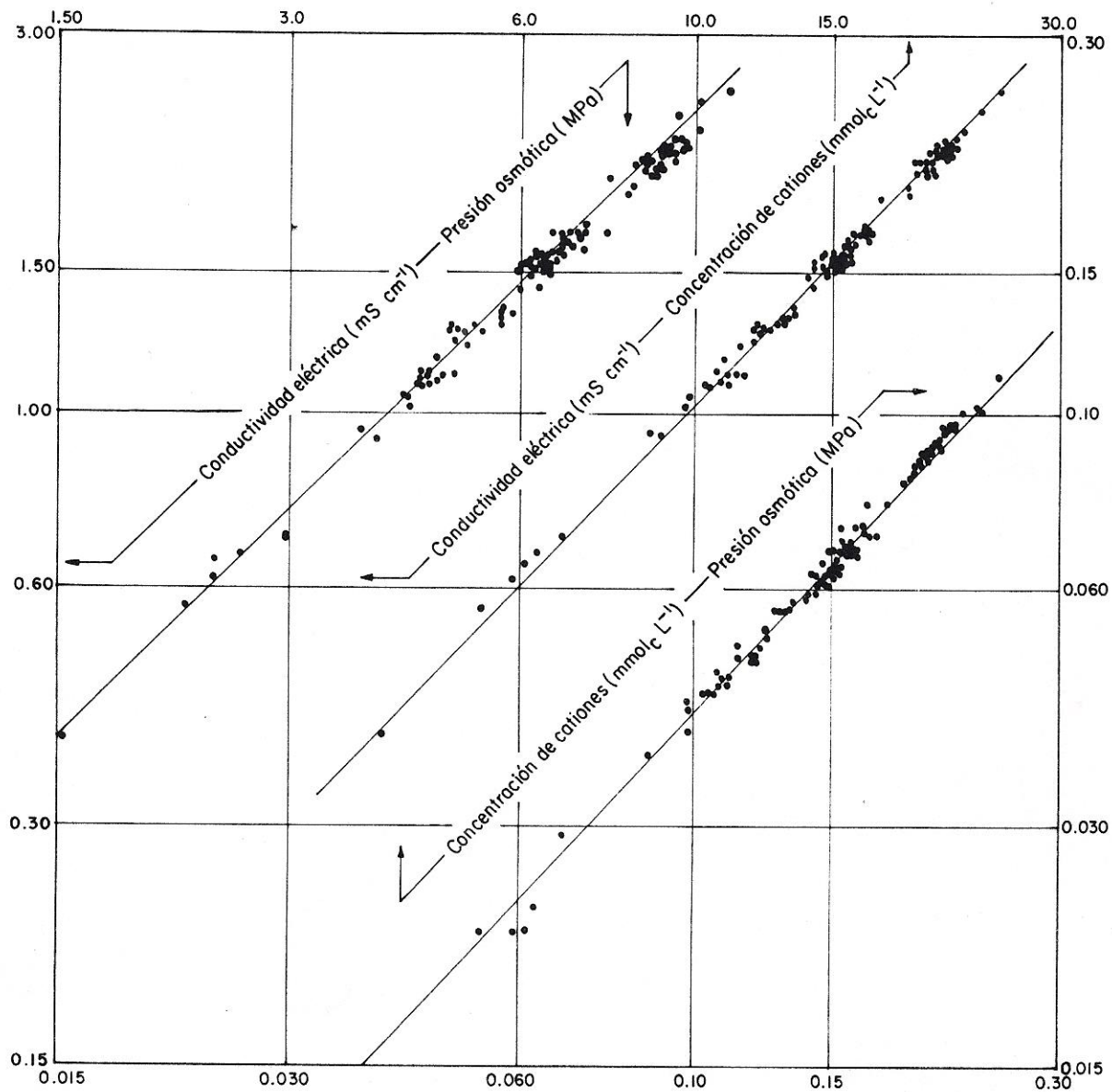


Figura 14. Relaciones entre: conductividad eléctrica ( $\text{mS cm}^{-1}$ ) y presión osmótica (MPa); conductividad eléctrica ( $\text{mS cm}^{-1}$ ) y concentración de cationes ( $\text{mmolc L}^{-1}$ ); concentración de cationes ( $\text{mmolc L}^{-1}$ ) y presión osmótica (MPa), de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapan, del Muestreo 1.



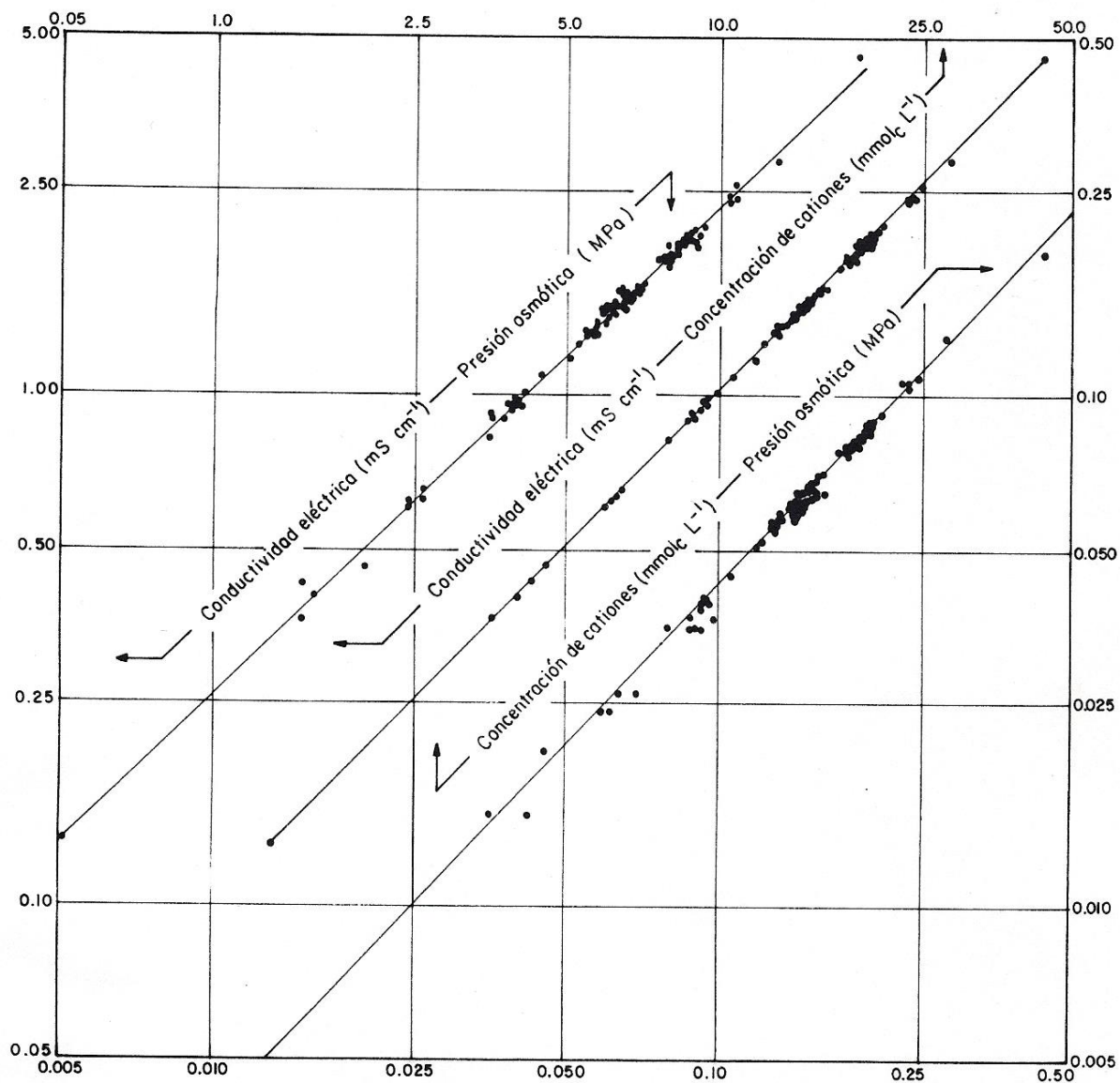


Figura 15. Relaciones entre: conductividad eléctrica ( $\text{mS cm}^{-1}$ ) y presión osmótica (MPa); conductividad eléctrica ( $\text{mS cm}^{-1}$ ) y concentración de cationes ( $\text{mmolc L}^{-1}$ ); concentración de cationes ( $\text{mmolc L}^{-1}$ ) y presión osmótica (MPa), de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2

### 6.6.3 Índice de salinidad efectiva

La salinidad efectiva es una forma más real del peligro que presentan las sales solubles del agua de riego al pasar a formar parte de la solución del suelo<sup>37</sup> ya que toma en cuenta la precipitación de las sales mas nocivas que tienen elevada solubilidad y que dan lugar a soluciones salinas muy concentradas.

La clasificación de las aguas residuales de acuerdo con el índice de salinidad efectiva para los Muestreos 1 y 2 se presenta en los Cuadros 35 y 36. De manera resumida esta clasificación se presentó como sigue (Cuadro 33):

Cuadro 33. Clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, de acuerdo con su salinidad efectiva.

Salinidad Efectiva (mmol <sub>c</sub> l <sup>-1</sup> )	Clase	Muestreo 1	Muestreo 2
		Número de muestras	
< 3	Buena	4	7
3 a 15	Condicionada	88	94
> 15	No recomendable	8	5

Fuente: Coras, 2000

De acuerdo con este índice de clasificación, la mayoría de las aguas que conduce la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, son aguas condicionadas para el riego, esto es debido a que las aguas residuales que riegan el Valle del Mezquital, son de composición sulfático-clorhídrico-bicarbonatadas, en donde las principales sales que predominan son NaCl, Na(HCO<sub>3</sub>), KHCO<sub>3</sub>, Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, Mg(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> y MgSO<sub>4</sub>.

La mayoría de estas aguas consideradas peligrosas tienen un contenido de sales que en si mismo no es demasiado perjudicial; no sucede así con las sales de MgSO<sub>4</sub>, el problema se presenta cuando esas aguas evolucionan en el suelo.

La evapotranspiración disminuye la humedad del suelo pero prácticamente no elimina estas sales, de forma que la solución del suelo se hace más salina a medida que el suelo se seca y una agua que inicialmente tuviera una concentración salina aceptable puede alcanzar elevados valores. Pero además al concentrarse estas sales, algunas de ellas pueden alcanzar su límite de solubilidad y precipitar, retirando de la solución del suelo determinados cationes y alterando las proporciones iniciales. Esto puede ocurrir con algunas sales de calcio entre ellas las sales de  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgCO}_3$  de baja solubilidad que se precipitan antes de alcanzar los niveles perjudiciales.

Debido a que los bicarbonatos se forman a partir de los carbonatos y estos son mayores al contenido de calcio y magnesio en estas aguas, trae como consecuencia un aumento de la proporción de sodio en el agua del suelo. Sin embargo las sales de  $\text{MgSO}_4$  presentes en estas aguas, son de las sales más perjudiciales por su alta solubilidad, al igual que el  $\text{NaCl}$  es la sal más frecuente de los suelos salinos y su toxicidad para las plantas es excepcionalmente alta y dado que las sales más nocivas son las que tienen elevada solubilidad, ya que dan lugar a soluciones salinas muy concentradas.

#### **6.6.4 Índice de salinidad potencial**

El criterio de salinidad efectiva tiene el inconveniente de considerar que se precipitaran todos los carbonatos, bicarbonatos y sulfatos, cosa que no siempre ocurre. Debido a esto se ha propuesto otro criterio, el de "Salinidad potencial", este se basa en la consideración de que las sales que se precipitarán serán los carbonatos y bicarbonatos, pero solo parte de los sulfatos, fundamentalmente el sulfato de calcio, permaneciendo solubles los sulfatos de sodio, sulfato de potasio y sulfato de magnesio<sup>37</sup>.

De acuerdo con el índice de salinidad efectiva para los Muestreos 1 y 2, la clasificación de estas aguas, se presenta en los Cuadros 35 y 36. Resumiendo esta información, su clasificación se presentó como sigue (Cuadro 34):

Cuadro 34. Clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán de acuerdo con su salinidad potencial.

Salinidad Potencial (mmol <sub>c</sub> l <sup>-1</sup> )	Clase	Muestreo 1	Muestreo 2
		Número de aguas	
< 3	Buena	6	13
3 a 15	Condicionada	94	93
> 15	No recomendable	0	0

Fuente: Coras, 2000

Las últimas sales que quedan en solución son los cloruros y parte de los sulfatos, cuando la humedad aprovechable del suelo desciende a niveles inferiores al 50%, de manera que la solución del suelo se hace más salina conforme esto sucede.

Debido a la movilidad del Na<sup>+</sup> en las soluciones acuosas, permanece hasta valores muy altos de concentración. En cambio el Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> permanecen poco tiempo en las soluciones acuosas debido a que los compuestos de Ca<sup>2+</sup> y parcialmente de Mg<sup>2+</sup> son de baja solubilidad: CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub> y CaSO<sub>4</sub>.

En soluciones salinas, el Mg<sup>2+</sup>, en condiciones de migración permanente se asocia con el sulfato, formando una sal de muy alta solubilidad MgSO<sub>4</sub>, y considerando este índice de clasificación permanecen en la solución del suelo y no se precipitará, esto ocasionará que el suelo se haga más salino a medida que se seca.

Un alto contenido de estas sales disueltas en el suelo disminuye el potencial osmótico y exige a las raíces un esfuerzo adicional para absorber el agua, lo cual trae como consecuencia disminución de los rendimientos. Por lo anterior este índice es uno de los mejores estimadores del efecto de las sales sobre las plantas.

Cuadro 35. Clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1, de acuerdo con su salinidad efectiva y salinidad potencial. Buena (B); Condicionada (C) y No recomendable (NR).

No.	Salinidad Efectiva		Salinidad Potencial	
	mmolc L <sup>-1</sup>	Clasificación	mmolc L <sup>-1</sup>	
01	16.27	NR	8.35	C
02	15.68	NR	5.36	C
03	3.41	C	2.13	B
04	13.42	C	6.52	C
05	2.73	B	1.98	B
06	15.25	NR	8.39	C
07	14.20	C	7.93	C
08	15.28	NR	7.85	C
09	14.07	C	7.19	C
10	14.67	C	7.51	C
11	14.53	C	7.27	C
12	15.56	NR	7.49	C
13	14.84	C	8.36	C
14	13.52	C	7.71	C
15	14.44	C	7.47	C
16	14.08	C	7.47	C
17	18.07	NR	7.50	C
18	14.37	C	7.42	C
19	10.70	C	5.48	C
20	15.37	NR	4.69	C
21	9.91	C	5.41	C
22	10.20	C	5.48	C
23	10.11	C	5.46	C
24	13.14	C	5.23	C
25	9.11	C	5.44	C
26	10.56	C	5.62	C
27	10.42	C	5.82	C
28	10.39	C	5.98	C
29	10.47	C	5.66	C
30	9.01	C	5.84	C
31	10.25	C	6.41	C
32	11.19	C	6.19	C
33	6.10	C	3.98	C
34	10.80	C	6.47	C
35	11.10	C	6.41	C
36	7.35	C	4.80	C
37	7.42	C	3.89	C
38	6.46	C	5.89	C
39	6.58	C	4.09	C
40	7.80	C	4.42	C
41	1.75	B	1.35	B
42	10.85	C	6.20	C
43	6.45	C	4.02	C
44	6.51	C	5.11	C
45	16.01	NR	8.58	C
46	6.62	C	4.44	C
47	6.47	C	5.48	C
48	14.48	C	8.20	C
49	12.33	C	9.53	C
50	5.29	C	4.24	C

...Cuadro 35

No.	Salinidad Efectiva		Salinidad Potencial	
	mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>	Clasificación	mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>	
51	12.94	C	8.02	C
52	7.42	C	4.42	C
53	7.43	C	4.10	C
54	13.27	C	8.06	C
55	7.00	C	4.20	C
56	12.97	C	8.28	C
57	13.81	C	8.28	C
58	13.72	C	8.58	C
59	13.90	C	8.18	C
60	12.36	C	8.06	C
61	6.32	C	4.60	C
62	14.07	C	8.93	C
63	6.00	C	4.54	C
64	6.33	C	3.97	C
65	5.84	C	4.08	C
66	6.80	C	5.28	C
67	6.30	C	3.92	C
68	7.01	C	4.75	C
69	13.73	C	8.58	C
70	7.28	C	4.25	C
71	7.28	C	4.86	C
72	13.99	C	9.32	C
73	7.57	C	6.64	C
74	7.83	C	6.44	C
75	6.98	C	5.58	C
76	14.21	C	9.23	C
77	8.15	C	5.33	C
78	6.96	C	5.61	C
79	7.62	C	5.26	C
80	6.31	C	5.03	C
81	7.66	C	6.52	C
82	7.60	C	5.80	C
83	5.89	C	4.77	C
84	6.97	C	5.40	C
85	5.00	C	3.72	C
86	6.56	C	4.70	C
87	6.36	C	4.65	C
88	6.70	C	5.38	C
89	7.11	C	5.76	C
90	7.03	C	5.50	C
91	8.81	C	8.28	C
92	11.39	C	8.19	C
93	7.76	C	6.22	C
94	4.62	C	3.75	C
95	2.18	B	2.00	B
96	2.88	B	2.13	B
97	9.94	C	7.31	C
98	3.24	C	2.66	B
99	8.72	C	7.09	C
100	6.87	C	5.81	C
MEDIANA	8.76		5.64	
MEDIA	9.60		5.91	
MODA	14.07		5.48	
DESV. EST.	3.80		1.82	

Cuadro 36. Clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2, de acuerdo con su salinidad efectiva y salinidad potencial. Buena (B); Condicionada (C) y No recomendable (NR).

No.	Salinidad Efectiva		Salinidad Potencial	
	mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>	Clasificación	mmol <sub>e</sub> L <sup>-1</sup>	
01	0.36	B	0.30	B
02	14.53	C	6.80	C
03	36.62	NR	13.41	C
04	5.26	C	2.67	B
05	14.65	C	6.68	C
06	3.33	C	1.53	B
07	14.14	C	6.31	C
08	14.42	C	6.36	C
09	14.88	C	6.84	C
10	13.26	C	6.27	C
11	13.04	C	6.64	C
12	12.84	C	6.47	C
13	13.44	C	7.11	C
14	13.72	C	6.81	C
15	13.23	C	7.23	C
16	12.59	C	6.79	C
17	12.21	C	6.98	C
18	13.38	C	6.86	C
19	12.57	C	7.41	C
20	13.20	C	7.18	C
21	8.30	C	4.97	C
22	10.04	C	5.07	C
23	8.29	C	4.59	C
24	9.94	C	4.21	C
25	10.08	C	5.04	C
26	9.72	C	4.89	C
27	10.70	C	5.25	C
28	10.30	C	5.11	C
29	10.72	C	5.24	C
30	1.57	B	0.44	B
31	11.07	C	5.52	C
32	1.17	B	0.82	B
33	11.07	C	4.81	C
34	9.83	C	4.81	C
35	9.05	C	3.86	C
36	12.99	C	4.96	C
37	10.33	C	5.06	C
38	7.83	C	2.72	B
39	12.80	C	6.38	C
40	9.41	C	5.39	C
41	10.94	C	5.13	C
42	5.44	C	3.36	C
43	12.57	C	5.13	C
44	12.61	C	4.68	C
45	8.98	C	4.82	C
46	12.86	C	4.92	C
47	9.00	C	4.33	C
48	5.22	C	3.04	C
49	12.63	C	4.21	C
50	10.77	C	3.87	C
51	9.80	C	4.05	C
52	10.31	C	4.04	C
53	6.96	C	3.99	C

...Cuadro 36

No.	Salinidad Efectiva		Salinidad Potencial	
	mmolc L <sup>-1</sup>	Clasificación		mmolc L <sup>-1</sup>
54	0.99	B	0.64	B
55	7.73	C	3.98	C
56	7.63	C	3.97	C
57	7.36	C	3.99	C
58	10.19	C	5.06	C
59	4.84	C	2.95	B
60	14.17	C	10.12	C
61	8.70	C	5.18	C
62	7.32	C	3.92	C
63	8.47	C	5.37	C
64	11.31	C	7.85	C
65	7.74	C	4.12	C
66	11.09	C	7.90	C
67	13.00	C	7.51	C
68	10.95	C	7.29	C
69	9.35	C	4.09	C
70	7.70	C	3.21	C
71	4.72	C	3.11	C
72	5.35	C	3.07	C
73	5.91	C	5.45	C
74	17.25	NR	9.10	C
75	5.22	C	3.09	C
76	6.06	C	5.20	C
77	6.43	C	5.40	C
78	7.05	C	4.98	C
79	7.58	C	5.12	C
80	10.07	C	5.22	C
81	17.81	NR	8.99	C
82	11.46	C	5.55	C
83	7.47	C	5.53	C
84	10.24	C	5.54	C
85	9.68	C	5.85	C
86	5.27	C	3.15	C
87	5.46	C	4.22	C
88	22.24	NR	13.81	C
89	6.03	C	5.18	C
90	16.65	NR	7.69	C
91	6.41	C	4.96	C
92	9.55	C	5.20	C
93	6.13	C	5.04	C
94	9.72	C	5.23	C
95	13.24	C	7.54	C
96	9.48	C	5.20	C
97	12.73	C	7.98	C
98	2.59	B	1.59	B
99	3.20	C	1.64	B
100	2.79	B	1.76	B
101	7.63	C	6.11	C
102	1.99	B	1.83	B
103	7.55	C	5.77	C
104	4.37	C	3.65	C
105	3.54	C	2.84	B
106	6.86	C	5.30	C
MEDIANA	9.72		5.11	
MEDIA	9.61		5.14	
MODA	12.57		5.20	
DESV. EST.	4.75		2.20	



## 6.7 Clasificación de las aguas residuales con base en la sodicidad

### 6.7.1 Porcentaje de sodio intercambiable-relación de adsorción de sodio (PSI-RAS)

En este trabajo, con fines de predicción y con la intención de tener una inferencia de valores del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) en los suelos del Valle del Mezquital que se riega con aguas residuales urbano-industriales de diferentes valores de RAS se utilizaron los siguiente valores del coeficiente de selectividad iónica de Gapon<sup>151,152</sup>: 0.0072444, 0.011861 y 0.0168999 ( $\text{mmol L}^{-1}$ )<sup>-1/2</sup>. La relación funcional PSI-RAS de los Muestreos 1 y 2 para las aguas urbano-industriales que riegan el Valle del Mezquital, se presentan en la Figura 16.

Los orígenes de los iones de  $\text{Na}^+$  en las aguas residuales de las zonas urbano-industriales, se debe a que en los diferentes procesos industriales se utilizan grandes cantidades de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Por este motivo las aguas residuales urbano-industriales de la Ciudad de México tendrán grandes cantidades de  $\text{Na}^+$ . Debido a que las soluciones acuosas de los suelos que circulan y migran en los perfiles agronómicos de los suelos del Valle del Mezquital, se están enriqueciendo con iones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . Durante un proceso de interacción química con el agua condicionan procesos de hidrólisis de alta densidad. Los procesos de hidrolización de iones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  son los responsables de una alta alcalinidad en las soluciones de los suelos y como las aguas residuales del Valle del Mezquital tienen grandes cantidades de bicarbonatos los cuales son fácilmente hidrolizables. Como consecuencia de esto aumenta el pH.

Para un mismo valor de la RAS de las aguas superficiales y subterráneas para riego agrícola, que están interactuando con los diferentes sistemas coloidales de los distintos suelo, se tendrán diferentes cantidades de sodio intercambiable expresados a través del PSI. Esto se debe fundamentalmente a los valores del coeficiente de selectividad iónica, es decir, a las diferentes características topográficas de los sistemas coloidales de los suelos.

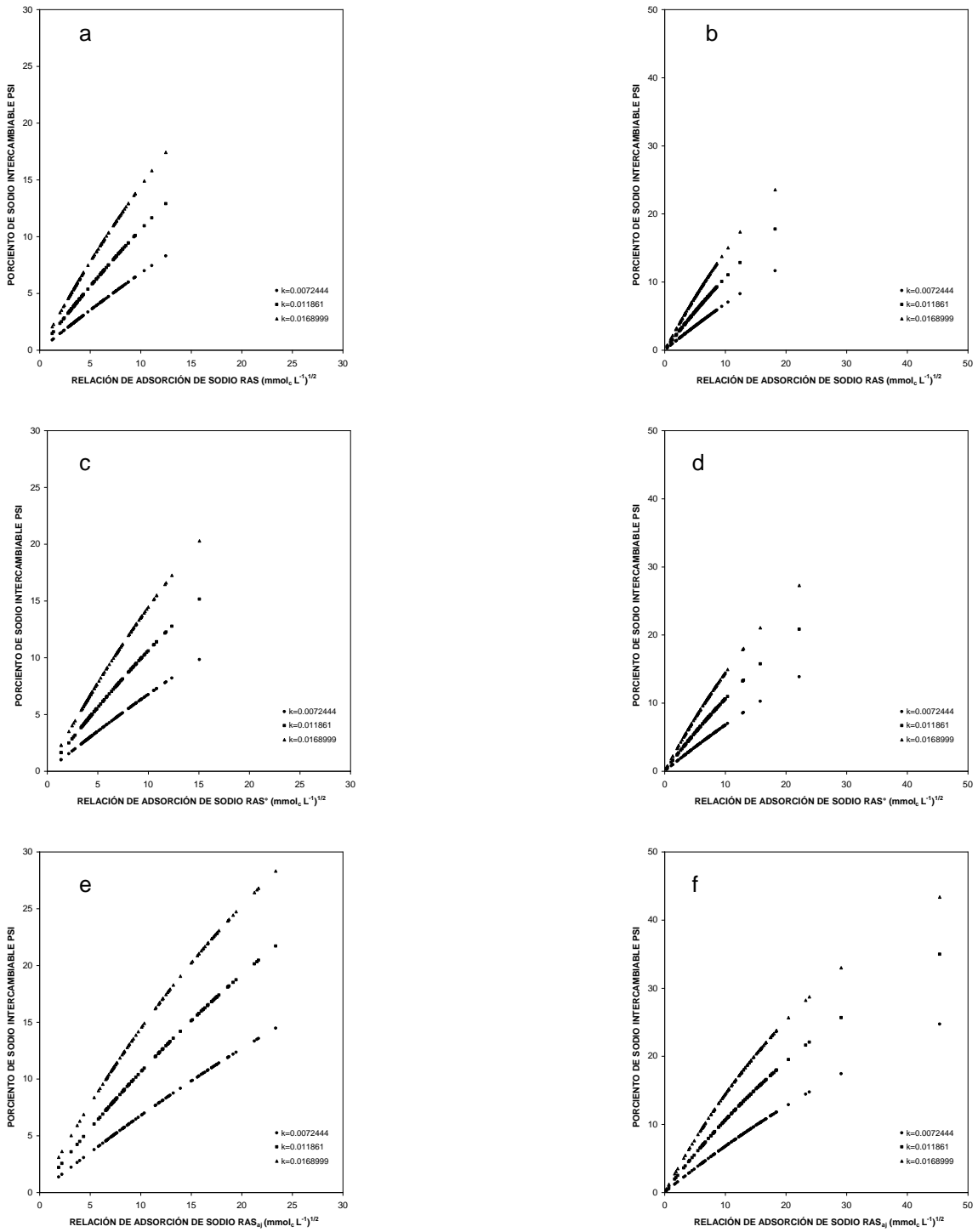


Figura 16. Relación PSI-RAS para las expresiones: a y b. PSI-RAS del Muestreo 1 y 2 respectivamente; c y d) PSI-RAS° del Muestreo 1 y 2 respectivamente y; e y f) PSI-RAS<sub>aj</sub> del Muestreo 1 y 2 respectivamente, de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán.

## 6.7.2 Clasificación de las aguas residuales de acuerdo con Richards, 1973

Los valores de la relación de adsorción de sodio, de las aguas residuales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, en sus diferentes formulaciones  $RAS_{or}$ ,  $RAS_{aj}$  y  $RAS^0$  para los Muestreos 1 y 2, se presentan en los Cuadros 38 y 39.

Las diferentes aguas quedan clasificadas en grupos (Cuadro 37), de acuerdo con el diagrama de Richards, 1973<sup>126</sup>.

Cuadro 37. Clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, de acuerdo con las diferentes formulaciones de la relación de adsorción de sodio de los Muestreos 1 y 2.

Formulaciones de RAS	Muestreo	C1S1	C2S1	C3S1	C3S2	C3S3	C3S4	C4S2	C4S3	C4S4
		Número de aguas								
$RAS = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}}$	1	-	6	46	40	5	-	2	1	-
	2	1	8	37	54	-	-	2	3	1
$RAS^0 = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}}$	1	-	6	38	40	13	-	2	1	-
	2	1	8	26	57	8	-	1	3	2
$RAS_{aj} = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}} [1 + (8.4 - pH_c)]$	1	-	6	1	45	17	28	-	-	3
	2	1	8	3	31	33	24	-	-	6

Las concentraciones de sodio  $C_{Na^+}$ , calcio  $C_{Ca^{2+}}$  y magnesio  $C_{Mg^{2+}}$ ; están expresados en  $mmol_e L^{-1}$

Cuando se comparan los valores expresados en porcentajes, de las diferentes formulaciones de expresión de la relación de adsorción de sodio, es notablemente evidente, que la relación de adsorción de sodio ajustado de acuerdo con Bower, 1965<sup>22</sup> los muestreos de agua se desplazan a otros grupos de clasificación, tal es el caso de las aguas del canal La Laminadora en ambos muestreos y las aguas de La Presa Debohdé en el Muestreo 2.

Sin embargo, si se tiene en cuenta que los suelos del Valle del Mezquital son de muy variada naturaleza en lo que se refiere a su composición mecánica, espesores litológicos y mineralogía, así como a las grandes variaciones que deben esperarse en los contenidos de bióxido de carbono  $\text{CO}_2$  solubilizado en las aguas, ya que en estas aguas la actividad biológica es muy variable.

No obstante que, aunque los valores del  $\text{RAS}_{aj}$  son superiores a los valores de  $\text{RAS}_{or}$  y  $\text{RAS}^0$ , es de gran utilidad, para efectos de predicción, conocer los valores máximos de la relación de adsorción de sodio o RAS que puede obtener una agua determinada en condiciones físico-químicas específicas, es decir, con altos o bajos contenidos de bióxido de carbono  $\text{CO}_2$ .

La utilidad de contar con un gran espectro de valores de la relación de adsorción de sodio, obtenidos estos, mediante diferentes formulaciones, que toman en cuenta los altos contenidos de bicarbonatos y la precipitación o solubilización de la calcita  $\text{CaCO}_3$  permite a los profesionales del mejoramiento de los suelos contar con valores de la relación de adsorción de sodio RAS de una gran confiabilidad para el diseño y la elaboración de medidas de mejoramiento de estas aguas residuales urbano-industriales que riegan el Valle del Mezquital.

La clasificación de las aguas residuales de acuerdo con la clasificación de Richards, se presenta en las Figuras 17 a 19 (Muestreo 1) y 20 a 22 (Muestreo 2).

Cuadro 38. Valores de las distintas formulaciones de la relación de adsorción de sodio, de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1.

No	RAS original	RAS corregido		RAS ajustado	
	RAS	Ca°	RAS°	pH <sub>c</sub>	RAS <sub>aj</sub>
	<b>mmol<sub>e</sub> L<sup>-1</sup></b>				
01	9.43	0.56	10.54	7.36	19.24
02	7.92	0.56	8.84	7.17	17.67
03	2.37	1.11	2.76	7.55	4.39
04	7.50	0.67	8.51	7.30	15.75
05	2.03	1.11	2.15	7.85	3.15
06	8.55	0.56	9.39	7.37	17.37
07	7.58	0.56	8.12	7.41	15.08
08	8.41	0.56	9.30	7.32	17.50
09	7.79	0.70	8.79	7.31	16.30
10	8.21	0.56	9.22	7.30	17.24
11	8.21	0.70	9.31	7.26	17.58
12	8.78	0.56	9.86	7.28	18.61
13	7.84	0.70	8.82	7.23	17.03
14	7.29	0.70	8.35	7.25	15.68
15	7.62	0.70	8.58	7.22	16.62
16	7.45	0.70	8.76	7.15	16.77
17	9.46	0.56	10.83	7.11	21.67
18	7.37	0.70	8.27	7.21	16.15
19	6.84	0.53	7.46	7.55	12.66
20	10.36	0.56	11.66	7.35	21.25
21	6.32	0.53	6.89	7.58	11.50
22	6.09	0.67	6.70	7.46	11.82
23	6.29	0.65	6.91	7.51	11.90
24	12.49	0.53	15.06	7.53	23.37
25	5.28	0.65	5.86	7.46	10.24
26	6.12	0.77	6.85	7.41	12.18
27	6.13	0.67	7.00	7.40	12.27
28	6.00	0.77	6.80	7.36	12.25
29	6.10	0.67	7.02	7.34	12.57
30	4.35	1.33	5.55	7.08	10.11
31	5.61	0.83	6.38	7.35	11.51
32	6.43	0.77	7.36	7.33	13.31
33	3.71	1.08	4.28	7.47	7.16
34	5.80	0.83	6.55	7.35	11.90
35	6.25	0.83	7.15	7.35	12.82
36	3.93	0.97	4.67	7.26	8.41
37	4.78	0.80	5.52	7.45	9.32
38	4.24	0.97	4.44	7.84	6.62
39	3.61	1.08	4.35	7.28	7.65
40	4.29	1.08	5.30	7.18	9.53
41	1.38	1.26	1.39	8.01	1.92
42	6.09	0.77	7.11	7.28	12.92
43	3.56	1.08	4.20	7.32	7.40
44	3.42	1.08	3.97	7.33	7.08
45	9.35	0.81	11.77	7.09	21.60
46	3.94	0.97	4.45	7.45	7.68
47	3.41	1.28	3.95	7.42	6.75
48	6.36	1.04	8.28	6.82	16.42
49	5.66	1.28	7.28	6.94	13.93
50	3.40	1.04	3.69	7.69	5.83

$$RAS = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}}$$

$$RAS^{\circ} = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}}$$

$$RAS_{aj} = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}} [1 + (8.4 - pH_c)]$$

...Cuadro 38

No	RAS original	RAS corregido		RAS ajustado	
	RAS	Ca°	RAS°	pH <sub>c</sub>	RAS <sub>aj</sub>
mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>					
51	6.25	1.17	8.45	6.88	15.77
52	4.02	0.97	4.90	7.20	8.84
53	4.16	0.97	5.12	7.20	9.15
54	6.81	1.12	9.09	6.95	16.70
55	3.90	1.08	4.66	7.25	8.38
56	6.61	1.12	8.73	6.97	16.08
57	7.60	0.87	9.26	7.12	17.33
58	7.99	0.87	9.69	7.21	17.50
59	7.62	0.95	9.59	7.06	17.83
60	6.38	1.17	8.05	7.03	15.12
61	3.41	1.28	4.15	7.29	7.20
62	8.08	1.17	10.84	7.08	18.75
63	3.60	1.08	4.10	7.53	6.74
64	3.75	1.08	4.29	7.45	7.31
65	3.36	0.97	3.83	7.44	6.58
66	3.08	1.23	3.79	7.05	7.26
67	3.73	0.97	4.28	7.46	7.23
68	5.34	0.80	5.66	7.84	8.34
69	11.11	0.67	12.34	7.64	19.56
70	3.96	1.08	4.87	7.17	8.85
71	5.22	1.08	6.15	7.52	9.82
72	8.78	0.83	9.99	7.46	17.04
73	3.45	1.23	4.06	7.20	7.59
74	3.64	1.12	4.41	7.10	8.38
75	3.20	1.12	3.80	7.12	7.30
76	8.25	1.04	10.59	7.12	18.22
77	3.96	1.12	4.79	7.08	9.19
78	3.15	1.23	3.85	7.05	7.40
79	3.59	1.12	4.29	7.08	8.33
80	2.82	1.23	3.44	7.05	6.63
81	3.51	1.12	4.18	7.13	7.96
82	3.75	1.08	4.46	7.19	8.30
83	3.33	1.19	3.88	7.40	6.66
84	3.19	1.23	3.95	7.04	7.52
85	2.88	1.28	3.47	7.33	5.97
86	2.98	1.12	3.57	7.10	6.86
87	2.94	1.08	3.47	7.14	6.66
88	3.05	1.23	3.72	7.07	7.12
89	3.46	1.08	3.99	7.25	7.44
90	3.18	1.23	3.92	7.03	7.53
91	3.92	1.59	4.87	7.13	8.90
92	6.01	0.91	6.95	7.27	12.81
93	3.63	1.12	4.30	7.14	8.20
94	3.00	1.04	3.36	7.60	5.40
95	1.25	1.30	1.39	7.62	2.22
96	2.16	1.30	2.47	7.67	3.74
97	5.43	0.83	5.94	7.49	10.37
98	2.44	1.30	2.62	7.77	3.97
99	4.18	1.44	4.89	7.27	8.91
100	3.06	1.71	3.61	7.36	6.25
MEDIANA	5.00	1.04	5.60	7.28	9.67
MEDIA	5.35	0.96	6.26	7.30	11.28
MODA	8.21	1.08	4.28	7.08	17.50
DESV. EST.	2.31	0.26	2.71	0.22	4.99

Cuadro 39. Valores de las distintas formulaciones de la relación de adsorción de sodio, de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2.

No	RAS original	RAS corregido		RAS ajustado	
	RAS	Ca°	RAS°	pH <sub>c</sub>	RAS <sub>aj</sub>
mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>					
01	0.43	1.32	0.33	8.68	0.31
02	8.48	0.70	9.86	7.23	18.41
03	18.21	0.61	22.20	6.91	45.34
04	4.21	0.84	4.76	7.68	7.25
05	8.40	0.70	9.70	7.27	17.89
06	3.84	0.80	3.84	8.12	4.92
07	8.29	0.67	9.68	7.23	18.00
08	8.27	0.67	9.98	7.16	18.53
09	8.63	0.70	9.99	7.25	18.54
10	7.50	0.67	9.18	7.16	16.80
11	7.17	0.67	8.44	7.21	15.71
12	7.13	0.77	8.54	7.17	15.91
13	7.22	0.81	8.69	7.14	16.33
14	7.36	0.81	8.85	7.12	16.78
15	6.90	0.83	8.39	7.10	15.88
16	6.37	0.70	7.26	7.21	13.95
17	6.22	0.83	7.31	7.15	13.99
18	7.09	0.77	8.50	7.13	16.09
19	6.04	1.04	7.69	6.97	14.69
20	6.71	0.95	8.11	7.11	15.37
21	4.90	0.80	5.60	7.41	9.76
22	6.09	0.65	7.03	7.39	12.24
23	5.16	0.80	5.89	7.43	10.17
24	6.48	0.65	7.42	7.44	12.70
25	6.10	0.77	7.13	7.33	12.63
26	6.27	0.75	7.31	7.41	12.49
27	7.35	0.65	8.56	7.45	14.33
28	6.24	0.77	7.29	7.32	12.98
29	6.39	0.67	7.52	7.31	13.36
30	1.30	0.98	1.34	7.94	1.89
31	6.64	0.83	7.97	7.26	14.21
32	0.98	1.39	1.10	7.69	1.67
33	8.15	0.65	9.51	7.46	15.81
34	5.90	0.88	7.17	7.25	12.69
35	5.89	0.65	6.85	7.40	11.78
36	8.00	0.67	9.64	7.22	17.45
37	6.23	0.77	7.28	7.31	13.03
38	4.39	0.88	5.47	7.13	9.97
39	6.78	0.83	8.41	7.07	15.80
40	4.94	1.00	5.77	7.25	10.63
41	7.10	0.77	8.50	7.32	14.78
42	3.40	1.04	3.89	7.54	6.34
43	7.08	0.67	8.23	7.21	15.51
44	7.49	0.67	8.99	7.19	16.56
45	5.30	0.88	6.32	7.29	11.19
46	7.71	0.77	9.74	7.13	17.50
47	5.38	0.88	6.54	7.26	11.51
48	3.28	0.93	3.84	7.48	6.31
49	7.84	0.67	9.92	7.14	17.71
50	6.31	0.67	7.34	7.25	13.58
51	5.55	0.77	6.65	7.18	12.33
52	5.97	0.83	7.58	7.10	13.75
53	3.87	0.97	4.45	7.30	8.12

$$RAS = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}}$$

$$RAS^{\circ} = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}}$$

$$RAS_{aj} = \frac{C_{Na^+}}{\sqrt{\frac{C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}}{2}}} [1 + (8.4 \cdot pH_c)]$$

...Cuadro 39

No	RAS original	RAS corregido		RAS ajustado	
	RAS	Ca°	RAS°	pH <sub>c</sub>	RAS <sub>aj</sub>
mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>					
54	0.45	1.08	0.47	7.84	0.71
55	4.40	0.97	5.31	7.24	9.51
56	4.32	0.97	5.22	7.26	9.26
57	3.99	1.08	4.93	7.16	8.95
58	5.74	0.91	6.93	7.19	12.69
59	2.55	1.28	3.42	7.10	5.88
60	5.47	1.17	6.86	6.81	14.17
61	4.83	1.08	5.86	7.26	10.35
62	4.08	0.97	5.04	7.20	8.98
63	4.24	1.12	5.39	7.06	9.93
64	5.42	1.23	7.59	6.89	13.61
65	4.45	0.97	5.50	7.23	9.66
66	5.28	1.33	7.00	6.99	12.72
67	6.72	0.91	8.31	7.04	15.86
68	5.14	1.23	7.07	6.87	13.01
69	5.22	1.12	7.17	6.99	12.59
70	5.02	0.97	6.27	7.31	10.50
71	2.93	1.04	3.36	7.51	5.54
72	3.39	1.04	3.90	7.51	6.41
73	2.52	1.28	3.13	7.03	5.98
74	9.45	0.95	12.86	6.93	23.35
75	3.24	1.04	3.89	7.40	6.48
76	2.67	1.28	3.35	7.05	6.28
77	2.82	1.33	3.46	7.04	6.65
78	3.29	1.08	4.05	7.08	7.63
79	3.62	1.08	4.38	7.12	8.26
80	4.67	1.00	5.91	6.92	11.59
81	10.46	0.70	13.00	7.11	23.97
82	5.33	1.00	6.72	6.90	13.34
83	3.41	1.23	4.25	7.04	8.06
84	4.70	1.00	5.91	6.93	11.62
85	5.67	0.88	6.61	7.33	11.74
86	3.30	1.04	3.92	7.43	6.51
87	3.22	1.39	3.97	7.39	6.47
88	12.44	0.81	15.77	7.06	29.11
89	2.62	1.28	3.24	7.04	6.20
90	8.54	0.81	10.38	7.00	20.51
91	2.85	1.19	3.54	7.04	6.73
92	4.33	1.00	5.42	6.94	10.66
93	2.69	1.19	3.26	7.08	6.24
94	4.45	1.00	5.58	6.92	11.03
95	6.32	1.04	8.46	6.88	15.93
96	4.24	1.00	5.33	6.91	10.58
97	6.15	1.17	8.19	6.93	15.19
98	1.85	1.01	2.04	7.69	3.16
99	2.40	1.01	2.66	7.67	4.15
100	1.91	1.01	2.16	7.62	3.41
101	3.38	1.44	4.22	7.03	8.01
102	1.13	1.43	1.34	7.51	2.15
103	3.45	1.33	4.35	7.01	8.25
104	2.64	1.04	2.86	7.68	4.55
105	1.99	1.23	2.32	7.40	3.98
106	3.29	1.39	4.22	7.06	7.72
MEDIANA	5.29	0.96	6.63	7.20	11.76
MEDIA	5.31	0.94	6.45	7.24	11.76
MODA	4.24	0.67	3.84	7.25	12.69
DESV. EST.	2.53	0.21	3.13	0.27	6.12



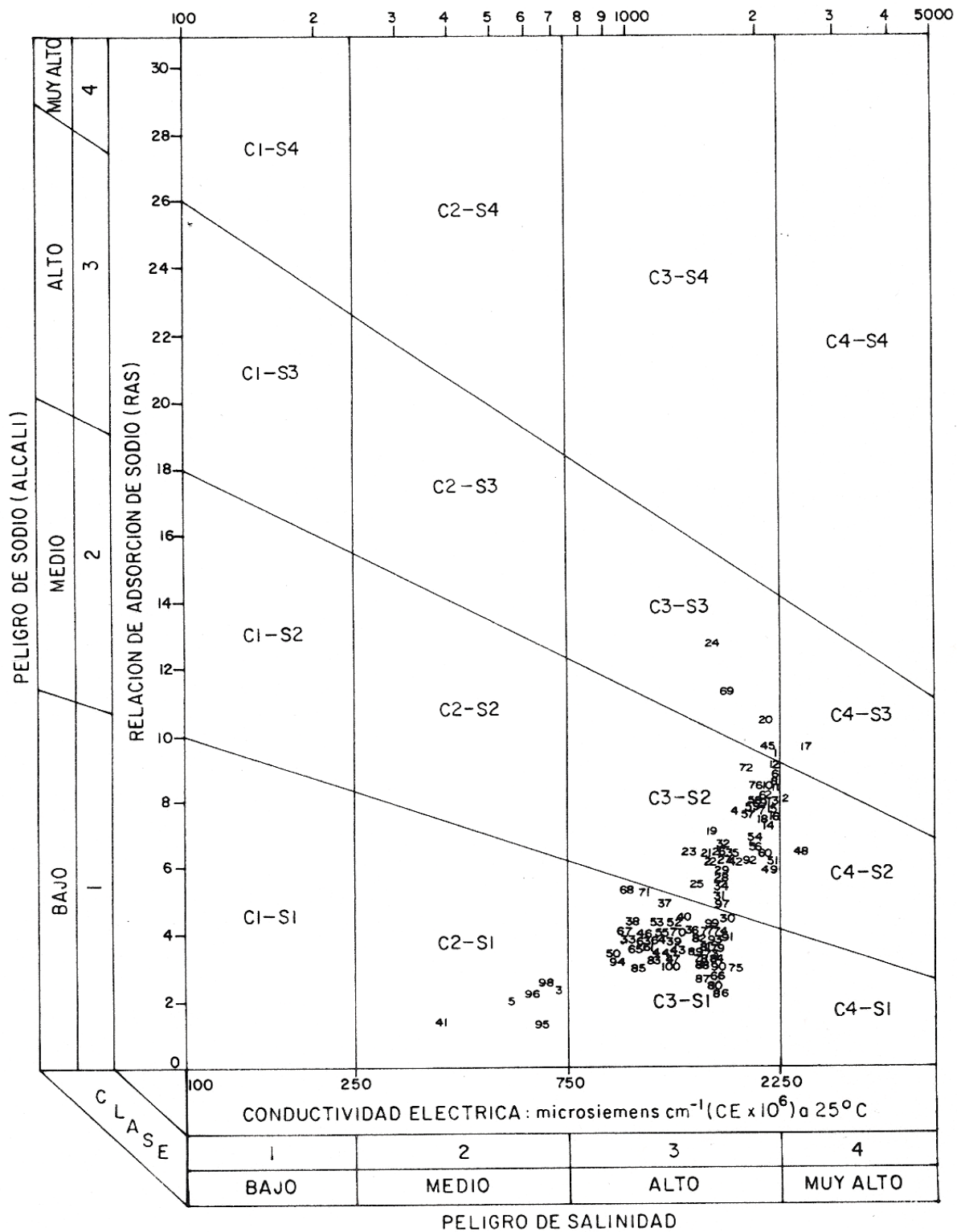


Figura 17. Diagrama de clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. RAS original-CE

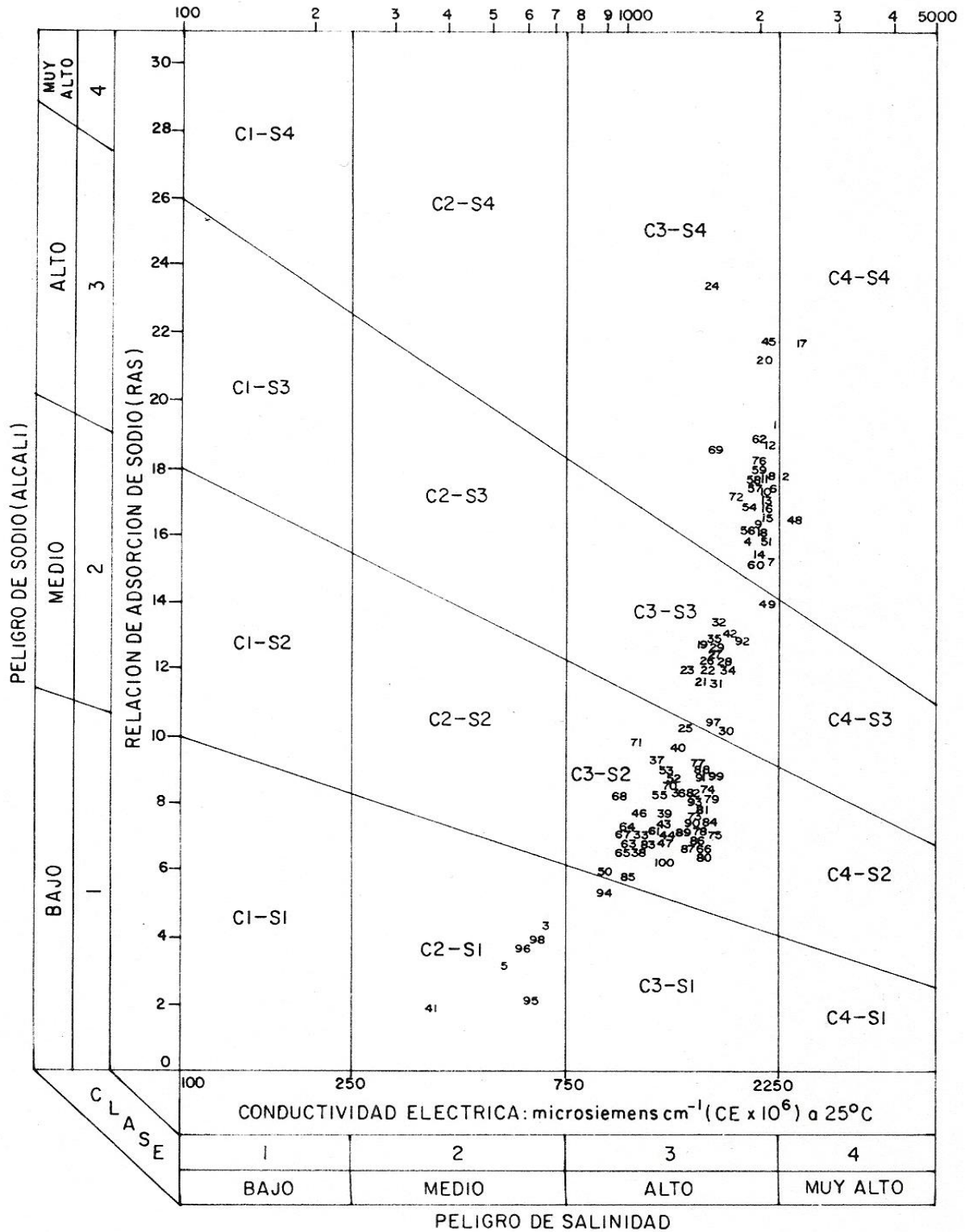


Figura 18. Diagrama de clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. RAS corregido-CE.

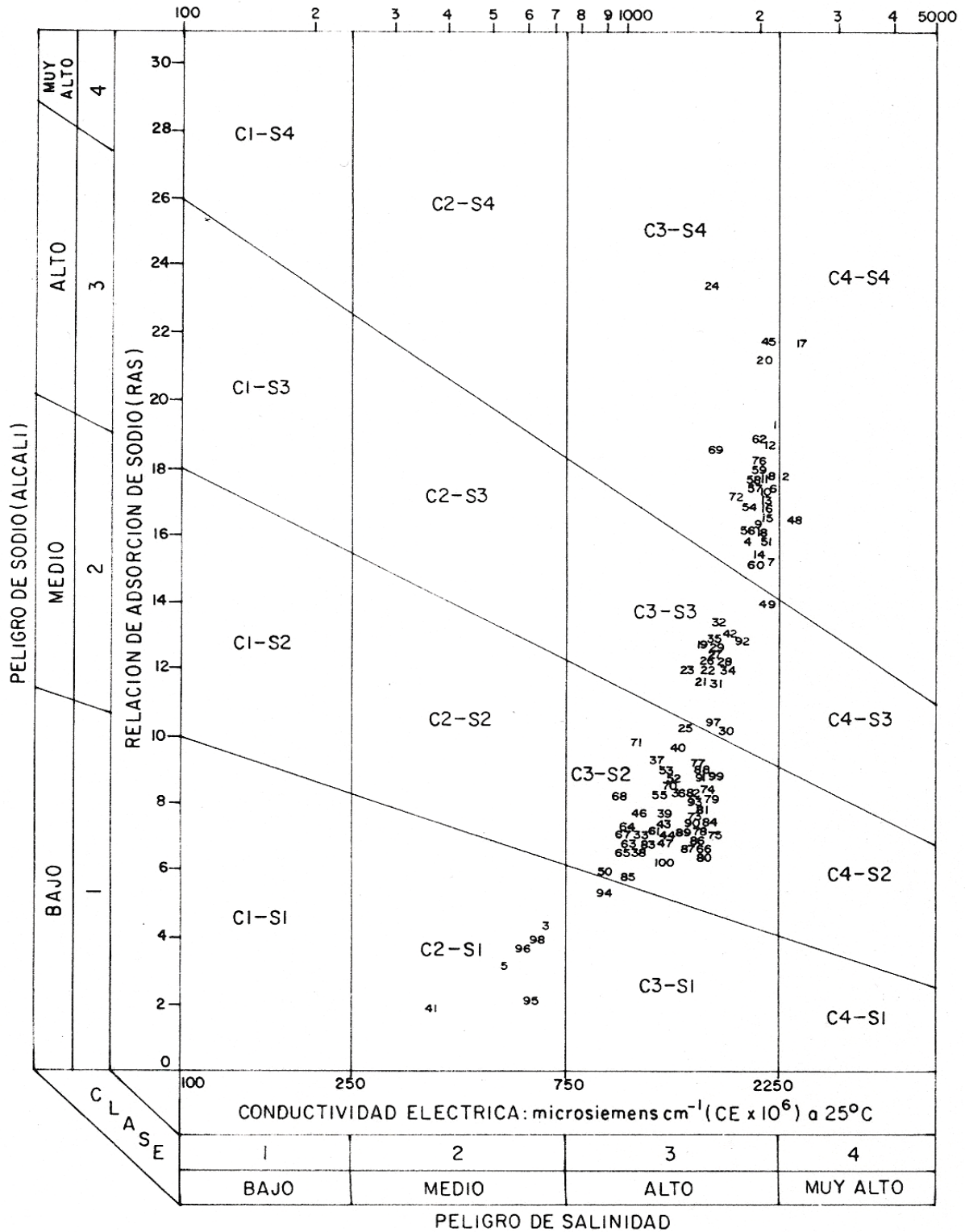


Figura 19. Diagrama de clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. RAS ajustado-CE.

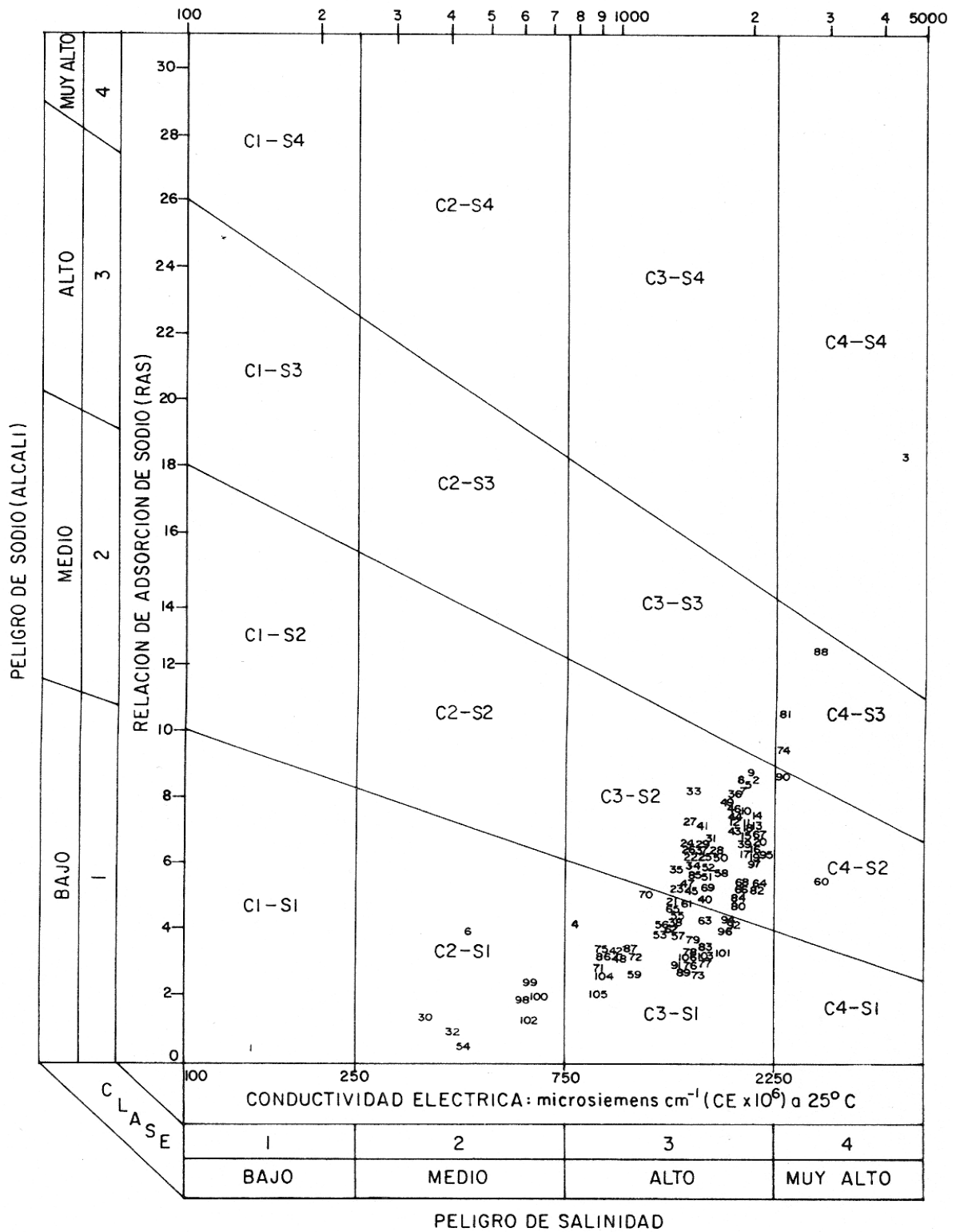


Figura 20. Diagrama de clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. RAS original-CE.

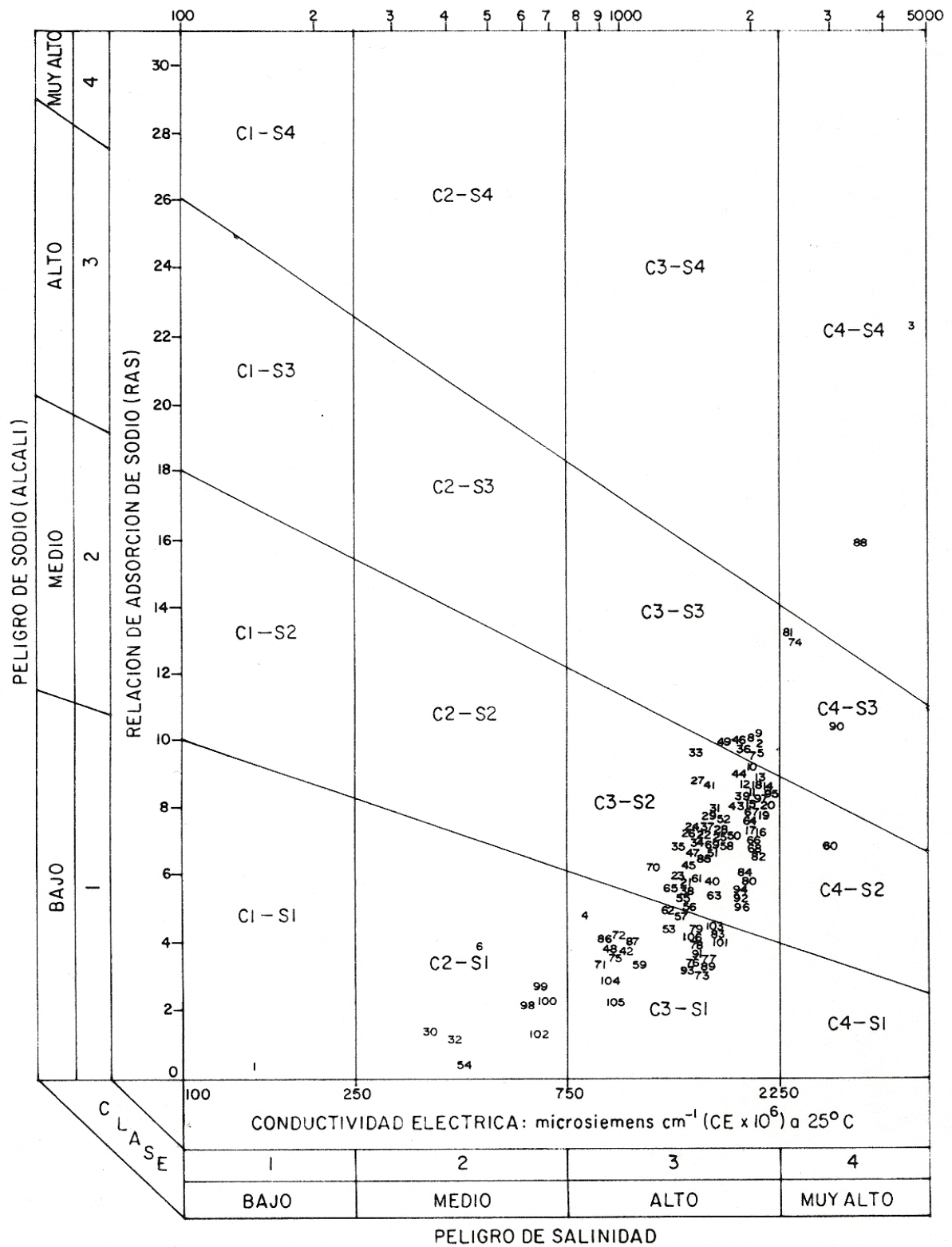


Figura 21. Diagrama de clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. RAS corregido-CE

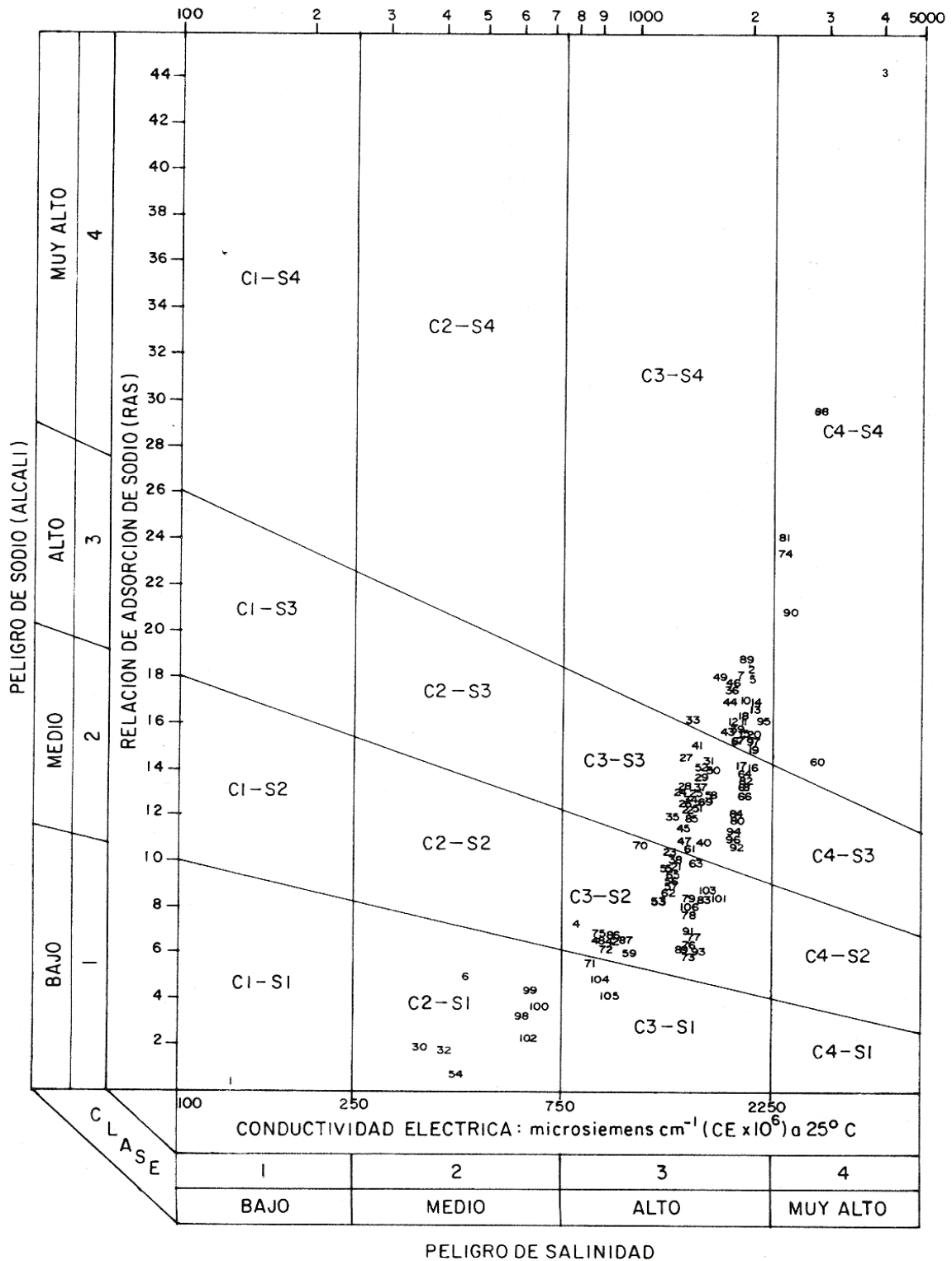


Figura 22. Diagrama de clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. RAS ajustado-CE.

### 6.7.3 Determinación de las sales hipotéticas

En los cálculos de la ecuación de Debye y Hückel; el parámetro que corresponde al tamaño del ion  $a_i$  se introdujo el tamaño del ion hidratado de calcio  $a_{iCa^{2+}}=6.0\text{\AA}$  para el caso del cálculo del coeficiente de actividad del ion calcio, y para el caso del cálculo del coeficiente de actividad del ion bicarbonato se introdujo en la fórmula de Debye y Hückel el valor del tamaño del ion hidratado del bicarbonato  $a_{iHCO_3^-}=4.41\text{\AA}$ . La fuerza iónica que se introdujo en la fórmula general de Debye y Hückel para el cálculo de los coeficientes de actividad de los iones calcio  $Ca^{2+}$  y bicarbonato  $HCO_3^-$  fue la que se determinó para cada muestra de agua en los Muestreos 1 y 2.

Para la determinación de las sales hipotéticas en cada muestra de agua se procedió de la siguiente manera: tomamos como ejemplo de cálculo la siguiente solución acuosa que proviene de 46 muestras de agua de sus intervalos de conductividad eléctrica de 1160-1740  $\mu\text{S cm}^{-1}$  (Cuadro 40).

Cuadro 40. Composición química de muestras de aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2.

Intervalo	No.	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	pH	$\text{mmol L}^{-1}$								$\Sigma$	$\text{mg L}^{-1}$		
				$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$Na^+$	$K^+$	$\Sigma$	$CO_3^{2-}$	$HCO_3^-$	$Cl^-$			$SO_4^{2-}$	
1160-1740	46	$\bar{x}$	1526	7.34	4.16	3.82	6.26	0.66	14.90	0.00	8.97	4.72	1.44	15.13	1082
		$\sigma$	69	0.38	0.27	0.52	0.69	0.04	0.90	0.00	0.45	0.41	0.22	0.61	44
		C.V.	4.51	5.15	6.49	13.65	10.97	5.86	6.01	0.00	5.03	8.66	15.64	4.05	4.11

La determinación de las sales hipotéticas de acuerdo con la solubilidad fue la siguiente:  $NaCl-0.00472\text{ M L}^{-1}$ ;  $NaHCO_3-0.001540\text{ M L}^{-1}$ ;  $KHCO_3-0.000660\text{ M L}^{-1}$ ;  $MgSO_4-0.002880\text{ M L}^{-1}$ ;  $Mg(HCO_3)_2-0.00370\text{ M L}^{-1}$  y  $Ca(HCO_3)_2-0.006240\text{ M L}^{-1}$ . El valor de la fuerza iónica de las sales hipotéticas fue  $I=0.019610\text{ M L}^{-1}$ .

La fuerza iónica de la solución salina que esta compuesta por los diferentes iones como:  $Ca^{2+}-0.00208\text{ M L}^{-1}$ ;  $Mg^{2+}-0.001910\text{ M L}^{-1}$ ;  $Na^+-0.006260\text{ M L}^{-1}$ ;  $K^+-0.000660\text{ M L}^{-1}$ ;  $CO_3^{2-}-0.008970\text{ M L}^{-1}$ ;  $HCO_3^- -0.00877\text{ M L}^{-1}$ ;  $Cl^- -0.004720\text{ M L}^{-1}$ ;  $SO_4^{2-}-0.00072\text{ M L}^{-1}$ , fué calculada utilizando la siguiente fórmula:

$$I = \frac{1}{2} \sum_i m_i z_i^2$$

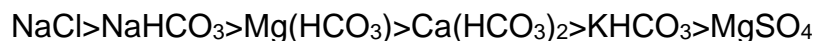
Donde:  $m_i$ , es la molaridad del ion  $m_i$  ( $M L^{-1}$ ) y  $z_i$ , es la valencia del ion  $z_i$

El valor de la fuerza iónica de los diferentes iones fue:  $I = 0.019725 M L^{-1}$ . De aquí se admite que ambos métodos de cálculo de la fuerza iónica de las soluciones salinas son exactas.

Las relaciones conjuntas de la fuerza iónica de las muestras de agua calculada para los iones individuales de las soluciones y la fuerza iónica calculada para las sales hipotéticas de ambos muestreos se muestran en la Figura 23. Las distribuciones de los tipos de sales hipotéticas de las aguas residuales urbano-industriales que riegan la zona del Valle del Mezquital se presentará en las Figuras 24 (Muestreo 1) y Figura 25 (Muestreo 2). Las sales hipotéticas se calcularon de acuerdo con su solubilidad y propiedades físico-químicas<sup>75</sup>.

La asociación de cationes con los aniones se llevó a cabo de la siguiente manera: 1. como las aguas residuales urbano-industriales son muy ricas en iones de  $Na^+$ ,  $HCO_3^-$  y  $Cl^-$ , en primer lugar se asociaron los  $Cl^-$  con los iones de  $Na^+$ , enseguida la cantidad restante de iones de  $Na^+$  se asociaron con los iones  $HCO_3^-$ . Los iones de  $K^+$  se asociaron con una fracción de  $HCO_3^-$ . 2. las cantidades de iones de  $SO_4^{2-}$  se asociaron con iones de  $Mg^{2+}$  y 3. las cantidades sobrantes de iones  $HCO_3^-$  se asociaron con los iones de  $Mg^{2+}$  y de  $Ca^{2+}$ , sin embargo, como los  $CO_3^{2-}$  y  $Mg(HCO_3)_2$  son más solubles, las cantidades finales de  $HCO_3^-$  primero se asociaron con los iones de  $Mg^{2+}$  y por último, las cantidades sobrantes de iones  $HCO_3^-$  se asociaron con los iones de  $Ca^{2+}$ .

Las sales que predominaron en los Muestreos 1 y 2 de las aguas urbano-industriales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán que riegan el Valle del Mezquital; se distribuyeron en el siguiente orden:





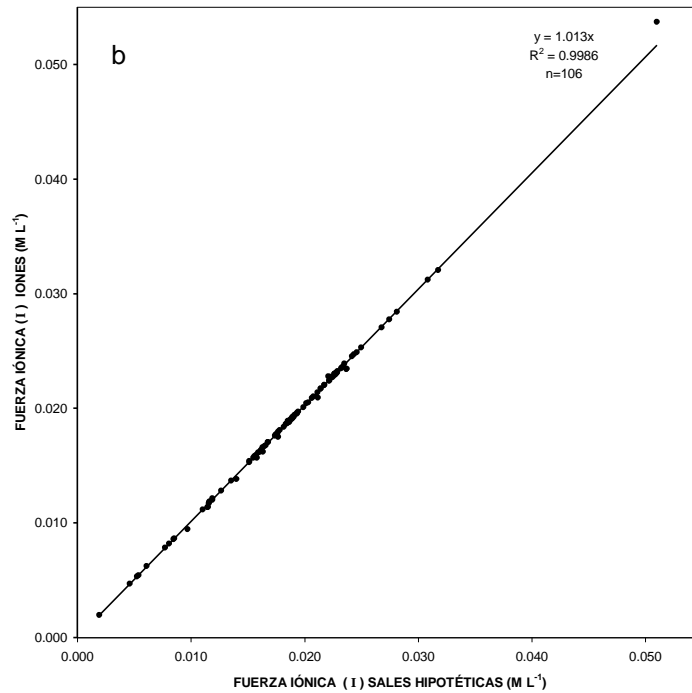
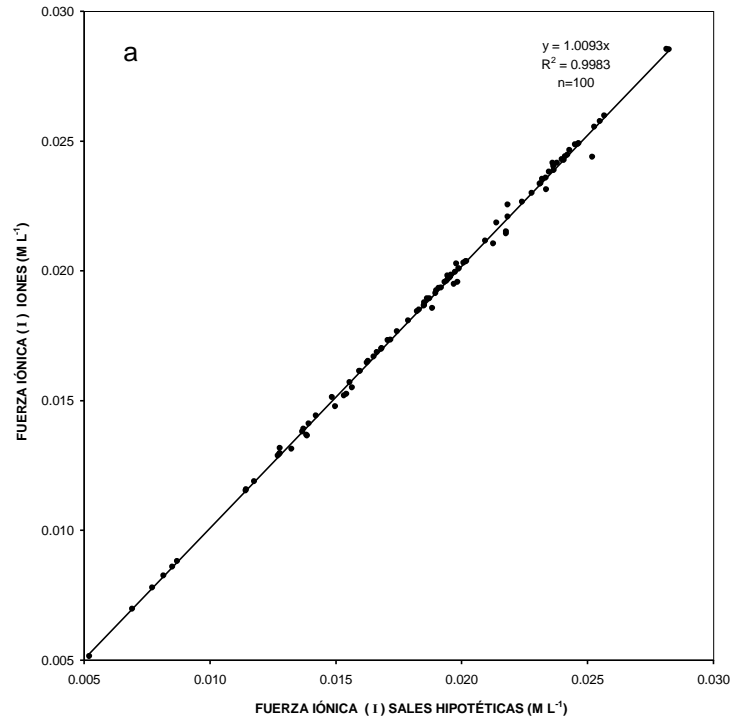


Figura 23. Relación entre la fuerza iónica de los iones individuales con la fuerza iónica de las sales hipotéticas de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán. a. Muestreo 1 y b. Muestreo 2.

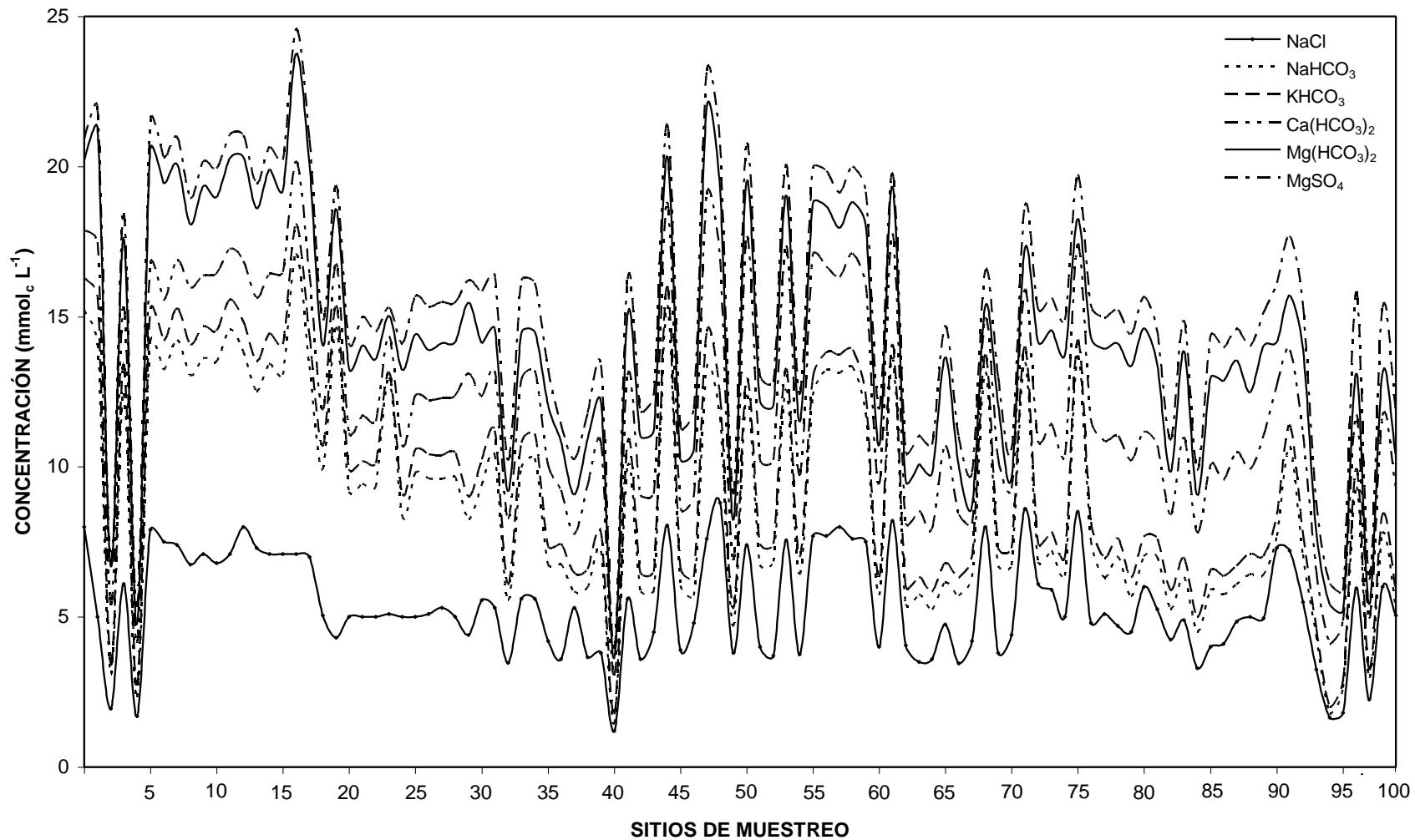


Figura 24. Concentración de las sales hipotéticas (mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1.

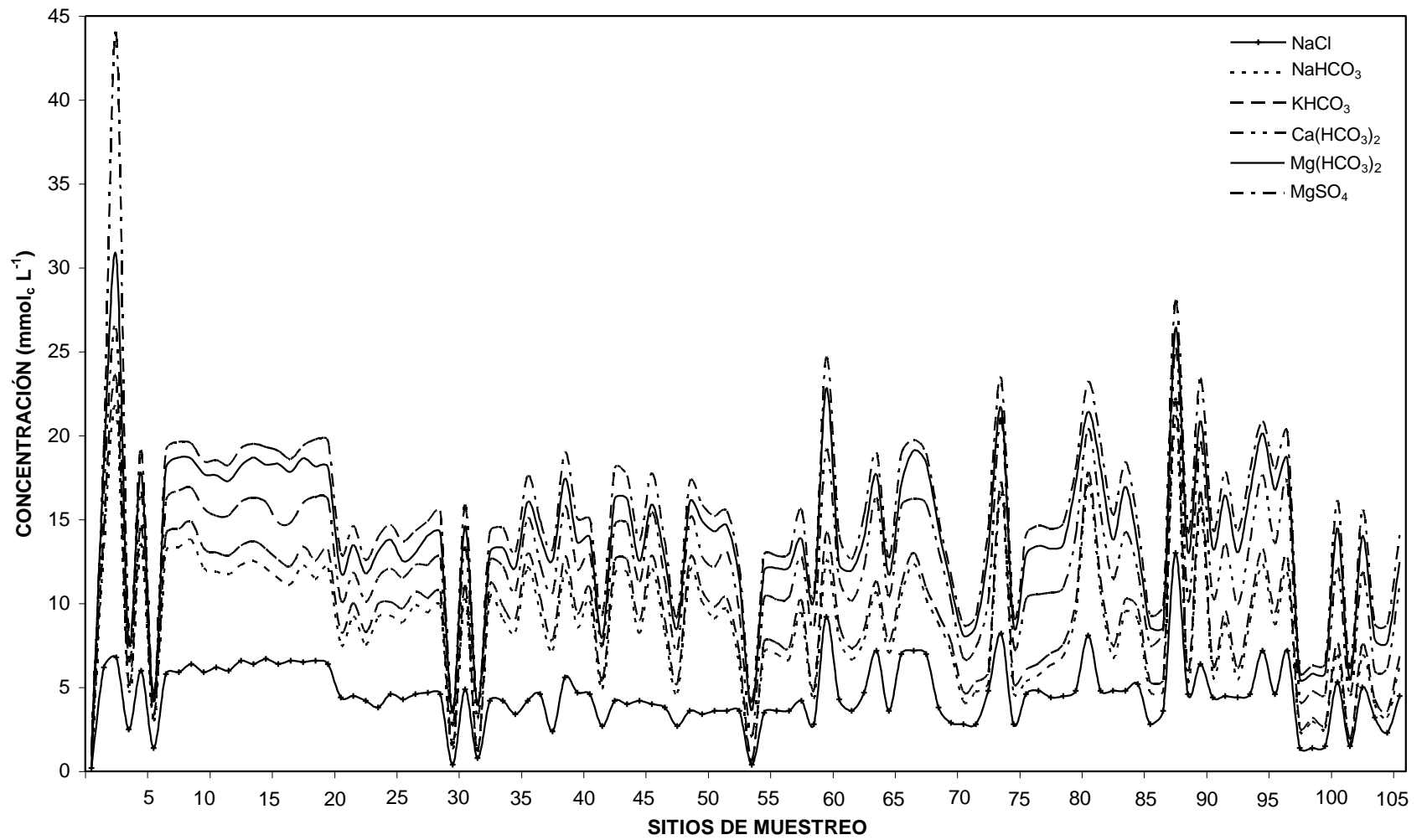


Figura 25. Concentración de las sales hipotéticas ( $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2.

#### **6.7.4 Clasificación de las aguas residuales con base en el peligro de disminución de la infiltración**

El peligro por salinidad de las aguas de riego puede tener un efecto negativo en la producción de cultivos. La reducción en la tasa de infiltración del agua de riego, puede por lo común ser atribuida a la formación de costras en la superficie, a la disposición y a la migración de las arcillas dentro de los poros de los suelos y al hinchamiento de las arcillas del grupo 2:1.

Las partículas coloidales son la fracción del suelo que determina de manera decisiva el comportamiento físico del suelo. Las partículas arcillosas poseen una gran área superficial, y por consiguiente, las partículas arcillosas son las más activas en los procesos de dispersión y de hinchamiento.

Las esmécticas son las arcillas mas activas en los suelos de las zonas áridas y semiáridas. Sin embargo, también el peligro por sodicidad de las aguas de riego depende a su vez, del sistema de manejo de estas aguas. La dispersión de las partículas de la superficie del suelo requiere de que se suministre energía y que se rompan los enlaces químicos entre las partículas del suelo.

El riego por aspersión, puede fuertemente incrementar los problemas de infiltración, que generalmente están asociados con las aguas de riego. Debido a que es más grande la posibilidad de que se propicie un encostramiento de la superficie del suelo, el método de riego por aspersión puede ser inadecuado, cuando se tienen aguas que tienden a causar dispersión e hinchamiento en los suelos y tal es el caso cuando se dispone de aguas ricas en sodio y bicarbonatos. Los sistemas de riego por goteo o sistemas de riego por superficie, producen una menor separación de partículas cuando se utilizan aguas con peligros de sodicidad. Esto es muy importante, cuando se utilizan aguas con algunas cantidades de bicarbonatos.

El proceso de infiltración se refiere a la facilidad con que el agua atraviesa la superficie del suelo, y ésta se mide en términos de sodicidad; el término permeabilidad se refiere mas correctamente a la conductividad hidráulica<sup>18,76</sup> la cual depende de la geometría de los poros del suelo y del contenido de agua en el suelo, y se utiliza para describir el flujo de agua que tiene ocurrencia dentro de la masa del suelo<sup>119</sup>.

En este trabajo, se utilizó el termino “problemas de infiltración” para indicar el efecto de la salinidad y de la sodicidad, en relación con la facilidad con que el agua aplicada entra y se desplaza en los primeros centímetros del suelo<sup>23</sup>. Un problema de infiltración se hace evidente, cuando el agua de riego no atraviesa la superficie del suelo a una velocidad lo suficientemente rápida, como para permitir la renovación del agua consumida por el cultivo entre dos riegos.

En las Figuras 26 a 31 que corresponden a los Muestreos 1 y 2 de las aguas residuales urbano-industriales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, en lo que se refiere a su capacidad de infiltración en los suelos de acuerdo con su relación de adsorción de sodio RAS y su conductividad eléctrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) se clasificaron de la siguiente manera (Cuadro 41).

La muestra de agua del canal de tierra de la Refinería de Tula en el muestreo 1, se clasifica como de reducción severa de la infiltración de acuerdo con el  $\text{RAS}_{aj}$ . La mayoría de las aguas de acuerdo al  $\text{RAS}_{or}$  en ambos muestreos son clasificadas sin problemas de reducción, sin embargo cuando se calculan de acuerdo al  $\text{RAS}_{aj}$  su valor incrementa. Los peligros debidos a la sodicidad de las aguas de riego del Valle del Mezquital; se deben a los altos contenidos de sodio en estas aguas, y por lo tanto, estas concentraciones elevadas pueden de manera negativa afectar la productividad de los diferentes cultivos.

Cuadro 41. Clasificación de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, con base en el peligro de disminución de la infiltración de los Muestreos 1 y 2.

Formulaciones de RAS	Muestreo	Sin reducción	Reducción ligera o moderada	Reducción severa
		Número de aguas		
$\text{RAS} = \frac{C_{\text{Na}^+}}{\sqrt{\frac{C_{\text{Ca}^{2+}} + C_{\text{Mg}^{2+}}}{2}}}$	1	84	16	-
	2	81	24	1
$\text{RAS}^\circ = \frac{C_{\text{Na}^+}}{\sqrt{\frac{C_{\text{Ca}^{2+}} + C_{\text{Mg}^{2+}}}{2}}}$	1	74	26	-
	2	60	45	1
$\text{RAS}_{\text{aj}} = \frac{C_{\text{Na}^+}}{\sqrt{\frac{C_{\text{Ca}^{2+}} + C_{\text{Mg}^{2+}}}{2}}} [1 + (8.4 - \text{pH}_c)]$	1	1	98	1
	2	6	99	1

Las concentraciones de sodio  $C_{\text{Na}^+}$ , calcio  $C_{\text{Ca}^{2+}}$  y magnesio  $C_{\text{Mg}^{2+}}$ ; están expresados en  $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$

A diferencia de los peligros por salinidad, los contenidos excesivos de sodio no perjudican la absorción del agua por las plantas, sin embargo, altos contenidos de sodio en las aguas de riego dificultan los procesos de infiltración del agua en el suelo. De tal manera que el crecimiento y desarrollo de las plantas se ve afectado por una disponibilidad de agua.

La reducción de la infiltración del agua en el suelo comúnmente es atribuido a las costras superficiales en los suelos, a la dispersión y migración de las arcillas en el medio poroso de los suelos, y al hinchamiento de las arcillas del grupo montmorillonítico de los suelos. El encostramiento de la superficie de los suelos impide la emergencia de las semillas, reduciéndose con esto, el número de plantas por unidad de área agrícola.

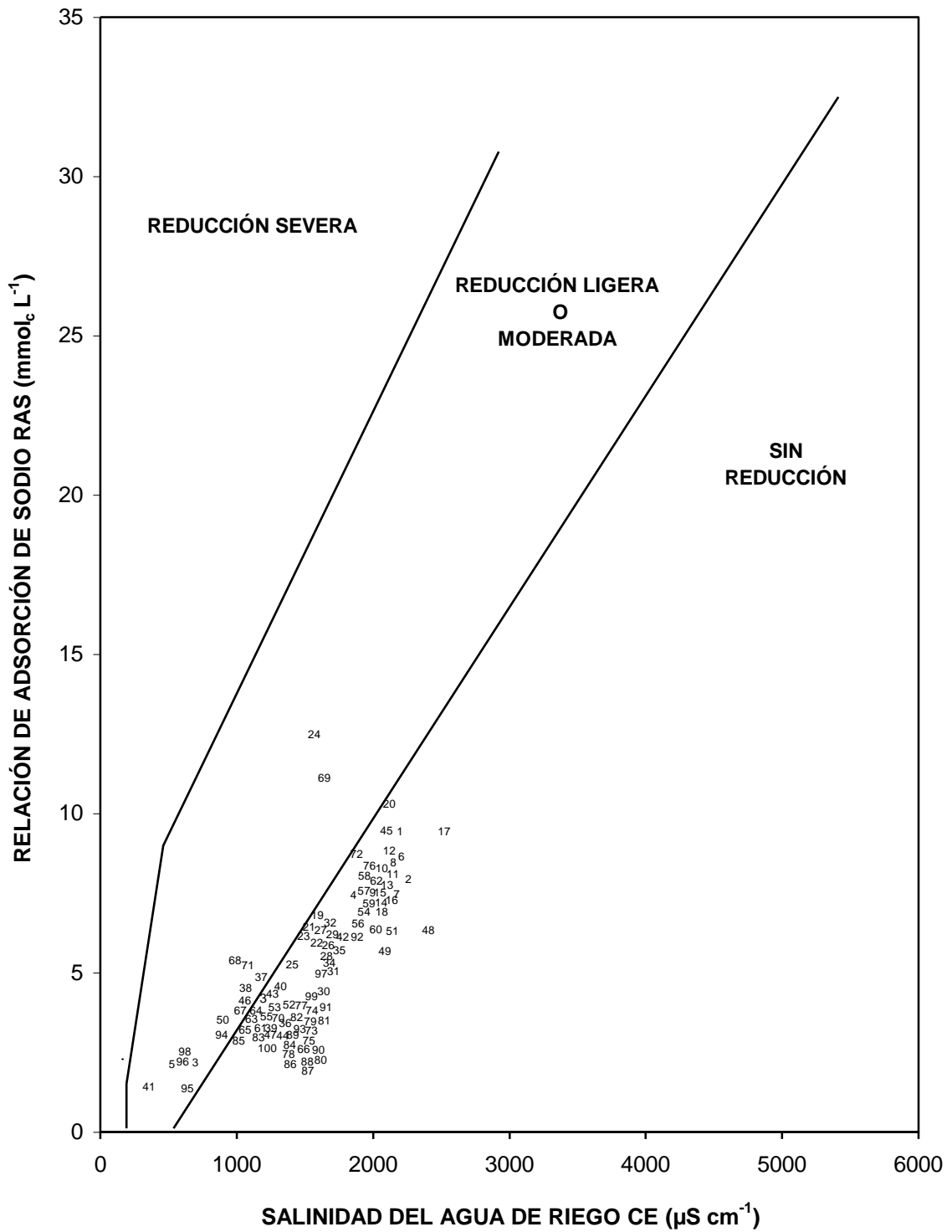


Figura 26. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. RAS original-CE.

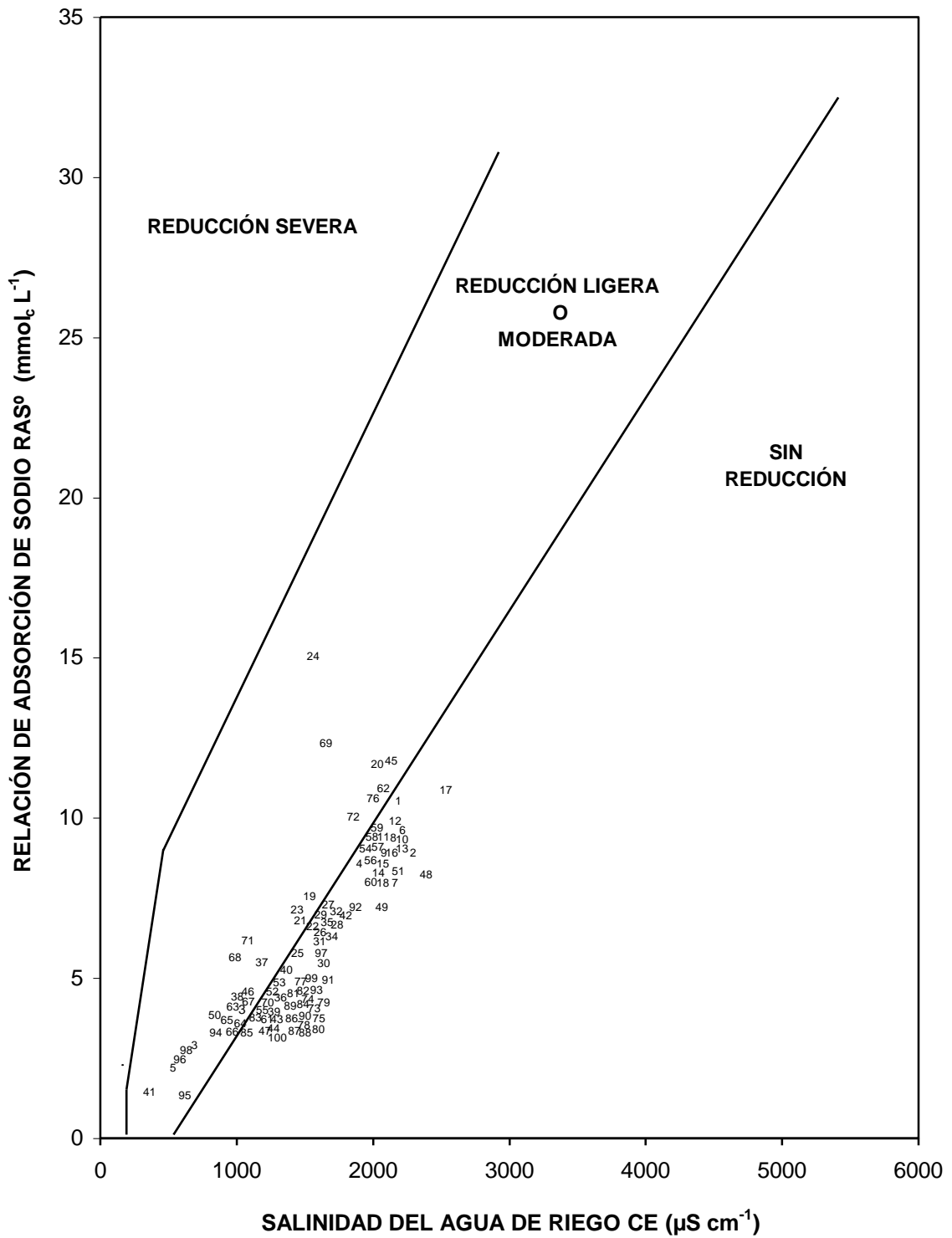


Figura 27. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. RAS corregido-CE.



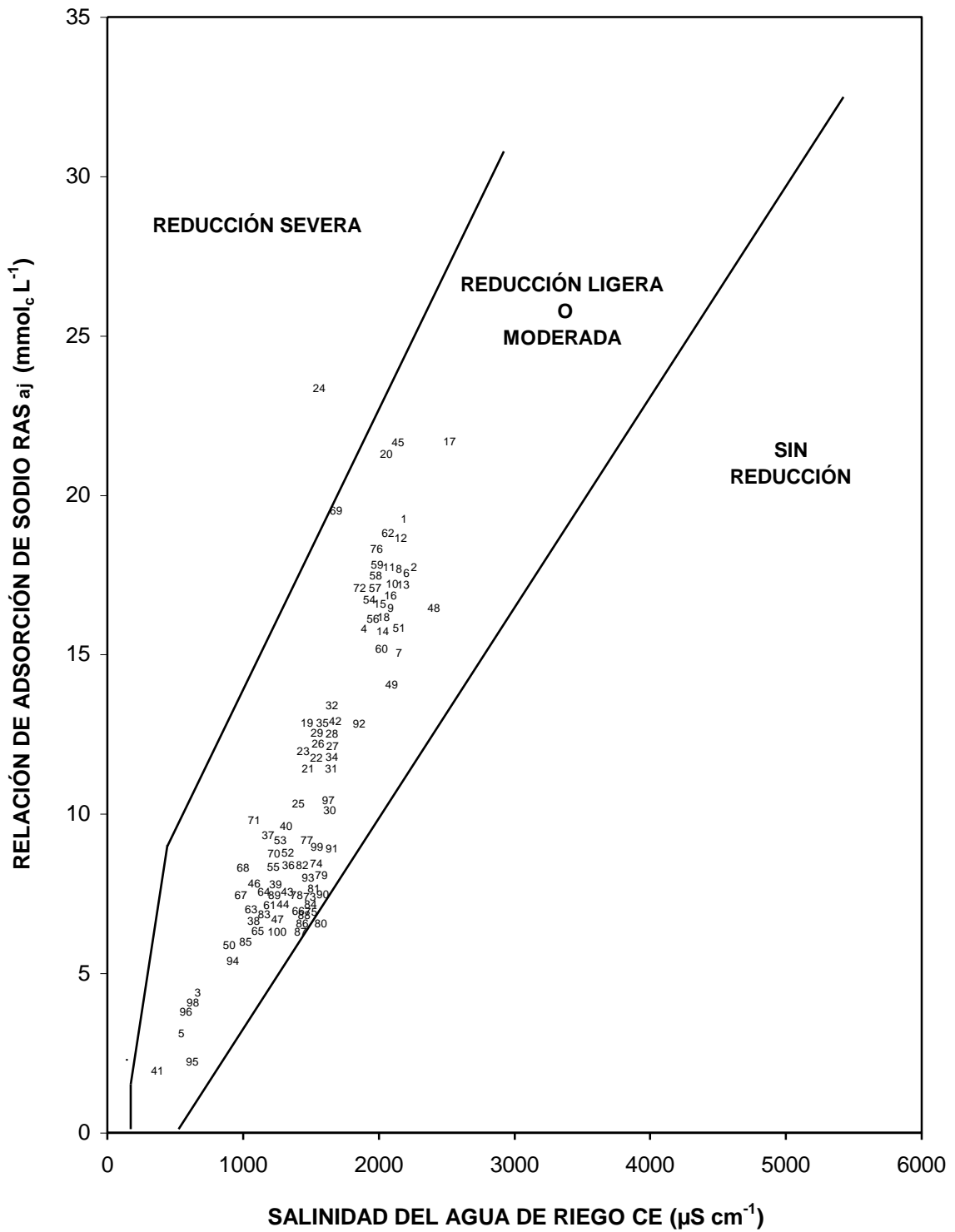


Figura 28. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. RAS ajustado-CE.

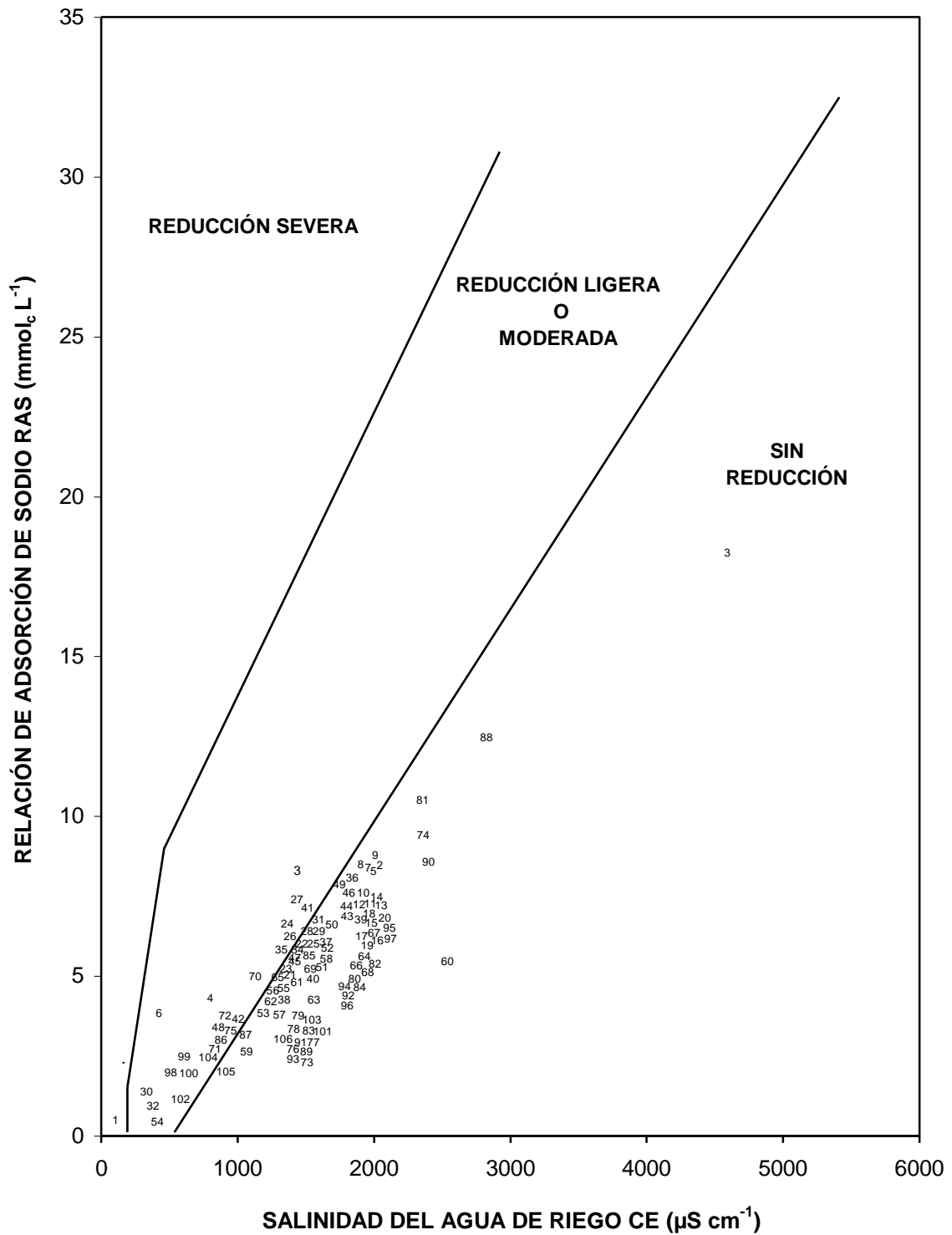


Figura 29. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. RAS original-CE

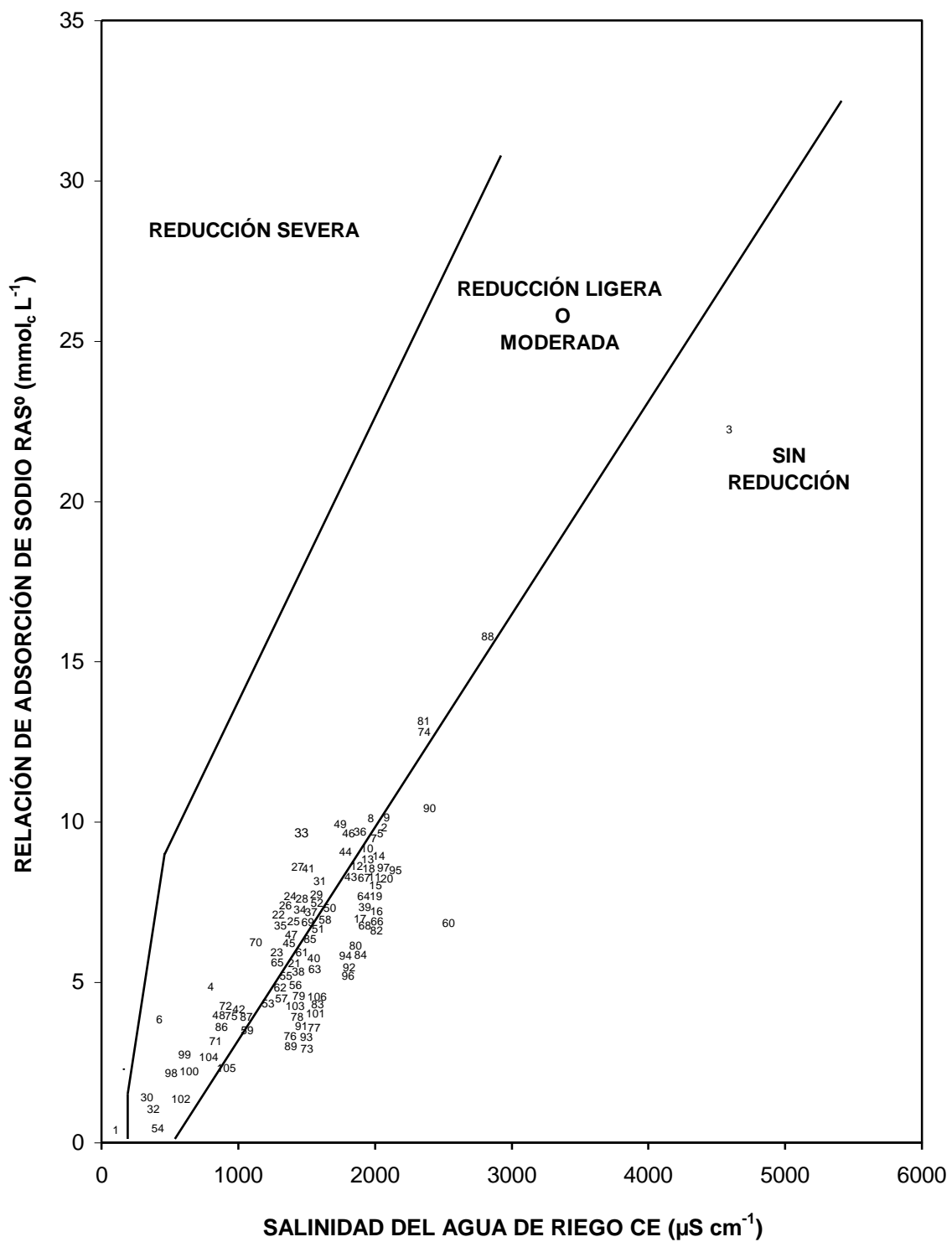


Figura 30. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. RAS corregido-CE

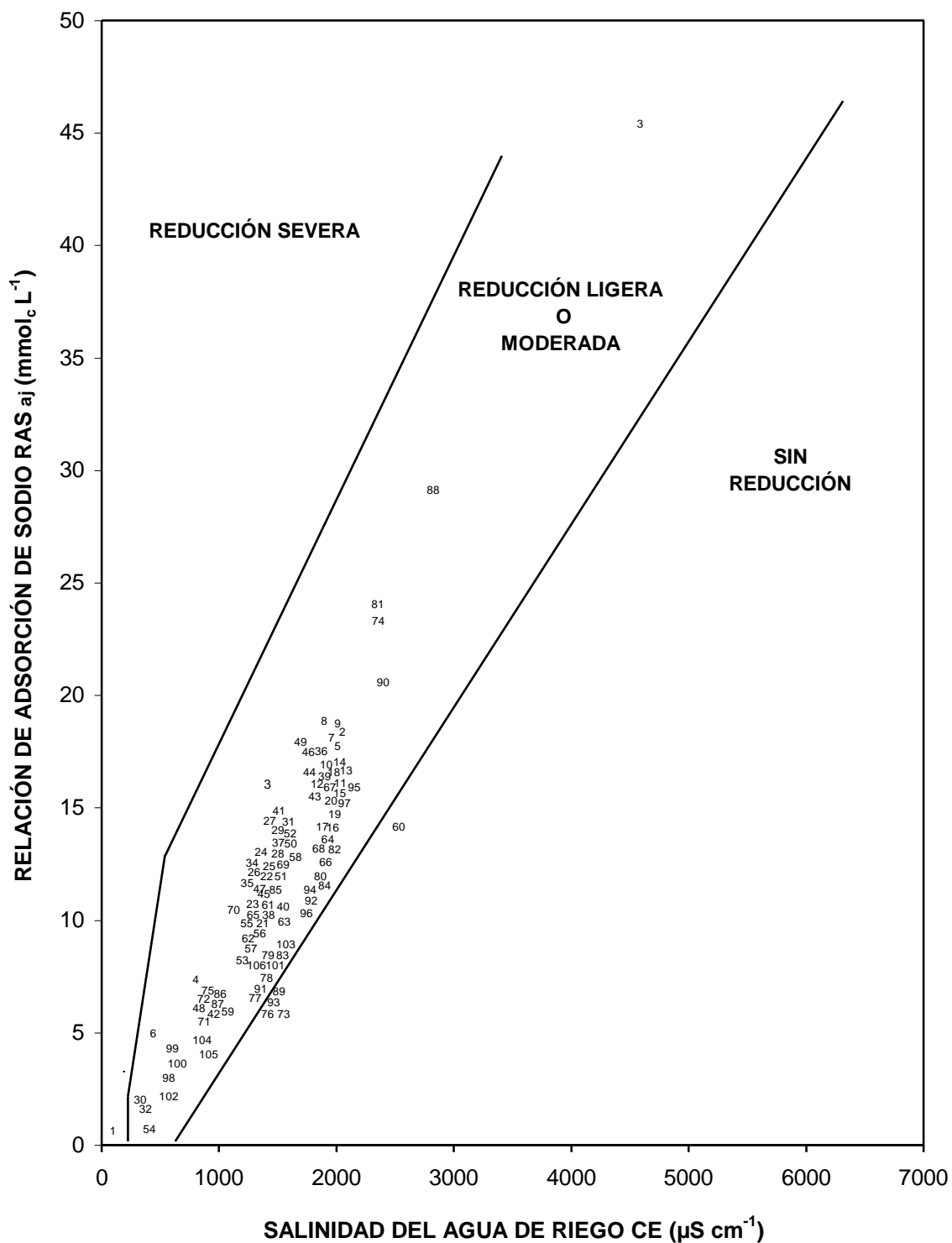


Figura 31. Reducción relativa de la infiltración provocada por la salinidad y la relación de adsorción de sodio de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. RAS ajustado-CE

### 6.7.5 Carbonato de sodio residual

Como se puede observar en la Figura 32 del Muestreo 1, las aguas residuales se distribuyeron de acuerdo a las siguientes contenidos de carbonato de sodio residual como sigue: a.  $6 < 0 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ; b. 17 entre  $0-1.25 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ; c. 23 entre  $1.25-2.50 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  y d.  $54 > 2.5 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ .

En el Muestreo 2 (Figura 33) la distribución de los contenidos de carbonato de sodio residual se presentó como sigue: a.  $2 < 0 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ; b. 15 entre  $0-1.25 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ; c. 15 entre  $1.25-2.50 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ; y d.  $74 > 2.5 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ . A semejanza del contenido en los muestreos de agua del carbonato de sodio residual, en las aguas del Muestreo 1; también es alto el porcentaje de aguas, en el Muestreo 2 que tienen grandes cantidades de carbonato de sodio residual

También aquí se debe señalar, que el uso de las aguas residuales urbano-industriales que riegan el Valle del Mezquital requiere de mejoramiento. Esto es aplicar fuentes de iones de calcio  $\text{Ca}^{2+}$ , como lo son las aplicaciones de diferentes dosis de yeso agrícola.

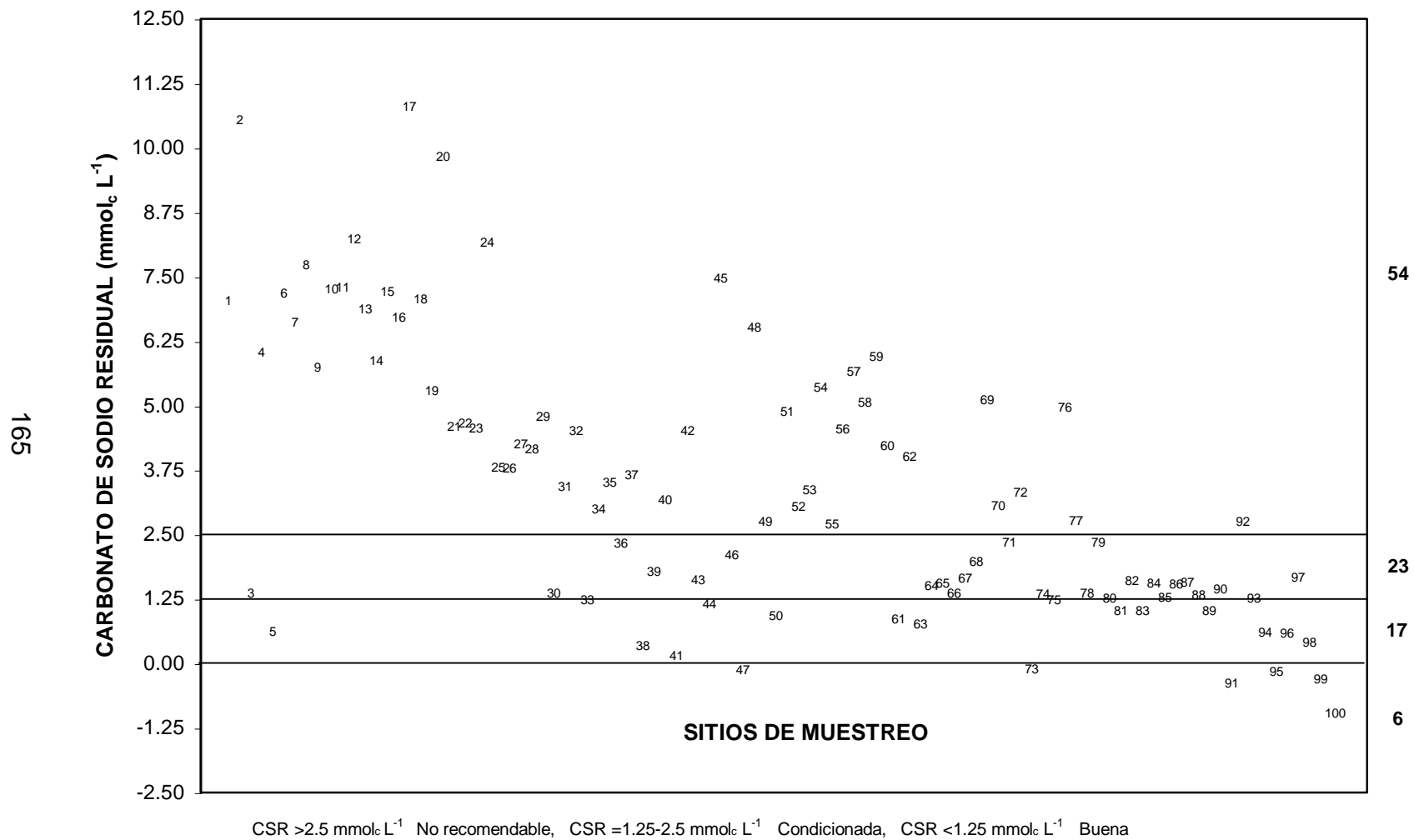


Figura 32. Distribución de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1, de acuerdo con el contenido de carbonato de sodio residual Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (mmolc L<sup>-1</sup>)

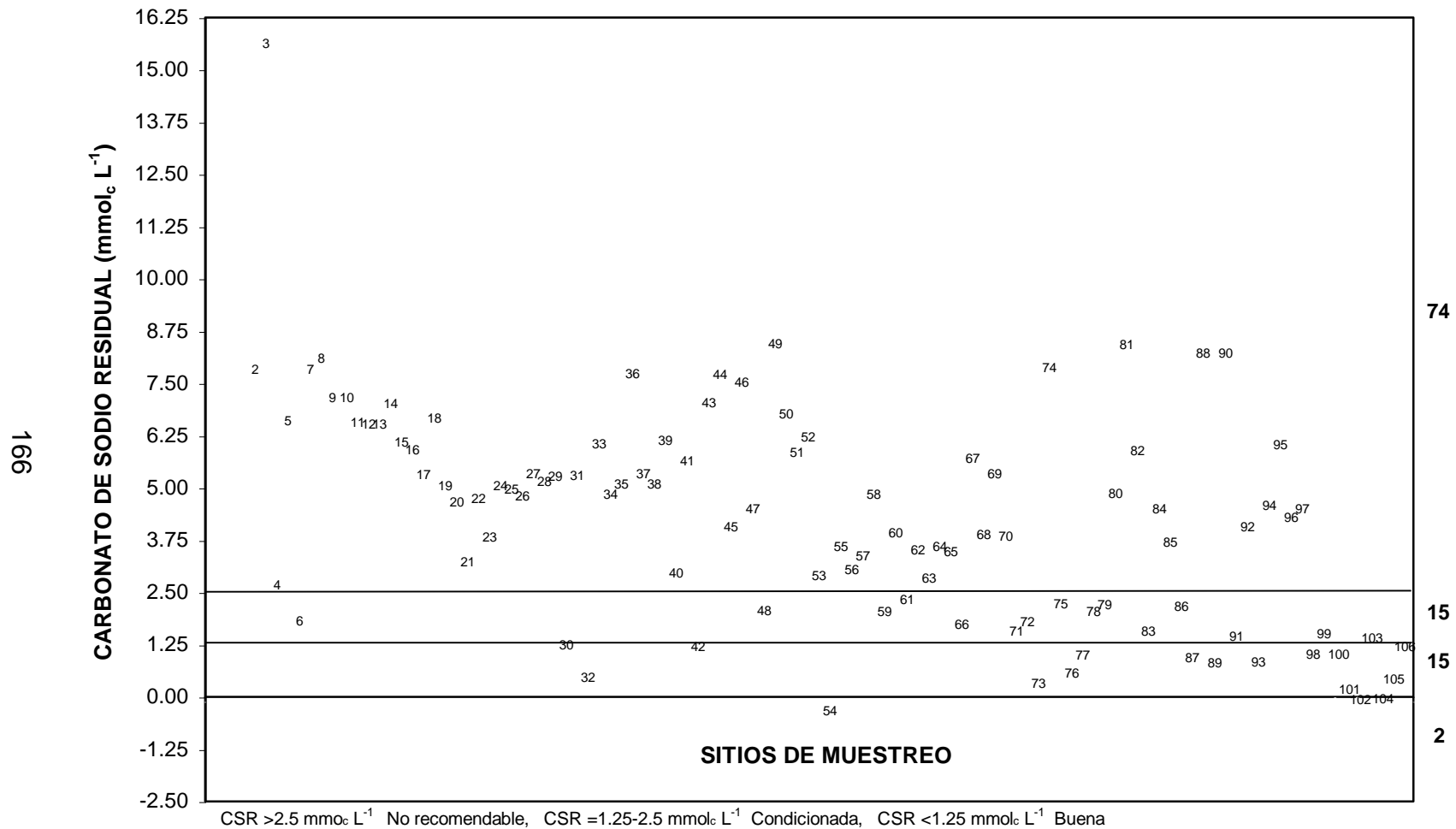


Figura 33. Distribución de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2, de acuerdo con el contenido de carbonato de sodio residual Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (mmolc L<sup>-1</sup>)

## **6.8 Clasificación de las aguas residuales con base en la toxicidad específica de iones**

### **6.8.1 Boro (B)**

La toxicidad del boro puede afectar prácticamente a todos los cultivos, pero como ocurre con la salinidad, la gama de tolerancia al boro es bastante amplia. La tolerancia al boro de los cultivos agrícolas que ocupan la mayor superficie en el Valle del Mezquital<sup>100</sup> son: Maíz 2-4 mg L<sup>-1</sup>; alfalfa 4-6 mg L<sup>-1</sup>; avena 2-4 mg L<sup>-1</sup>; cebada 3-4 mg L<sup>-1</sup>; trigo 0.75-1 mg L<sup>-1</sup>; y frijol 0.75-1 mg L<sup>-1</sup>.

En el Muestreo 1 (Figura 34) la variación de boro a partir de la estación de muestreo tres es casi constante y fluctúa entre 0.23-4.65 mg L<sup>-1</sup>. En el sitio de muestreo dos el contenido de boro es de 8.77 mg L<sup>-1</sup>. En el Cuadro 42 se presenta la clasificación del contenido de boro para el Muestreo 1, y se puede señalar lo siguiente: 3 muestras de agua son clasificadas como buenas para riego, 94 como condicionadas y 3 no recomendables para riego.

El contenido de boro para el Muestreo 2, se presenta en la Figura 35 se presenta, el cual tiene variaciones de 0.03-1.96 mg L<sup>-1</sup> a lo largo de todas los sitios de muestreo de las aguas residuales urbano-industriales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán que riegan el Valle del Mezquital. En el Muestreo 2 (Cuadro 43) la clasificación del contenido de boro se presentó de la siguiente manera: 17 son clasificadas como buenas para riego y 89 como condicionadas.



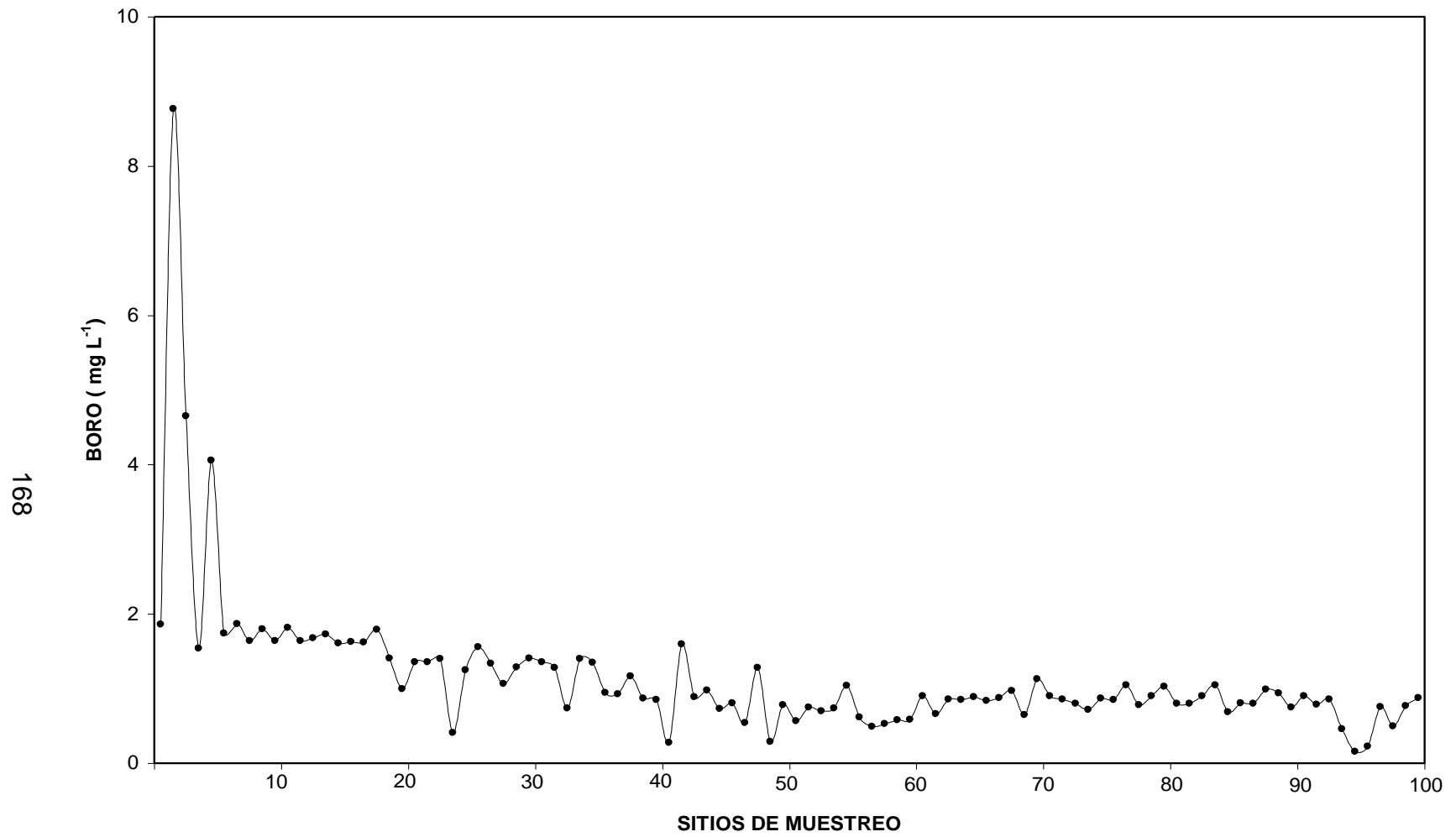


Figura 34. Concentración de Boro B (mg L<sup>-1</sup>) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapám, del Muestreo 1.

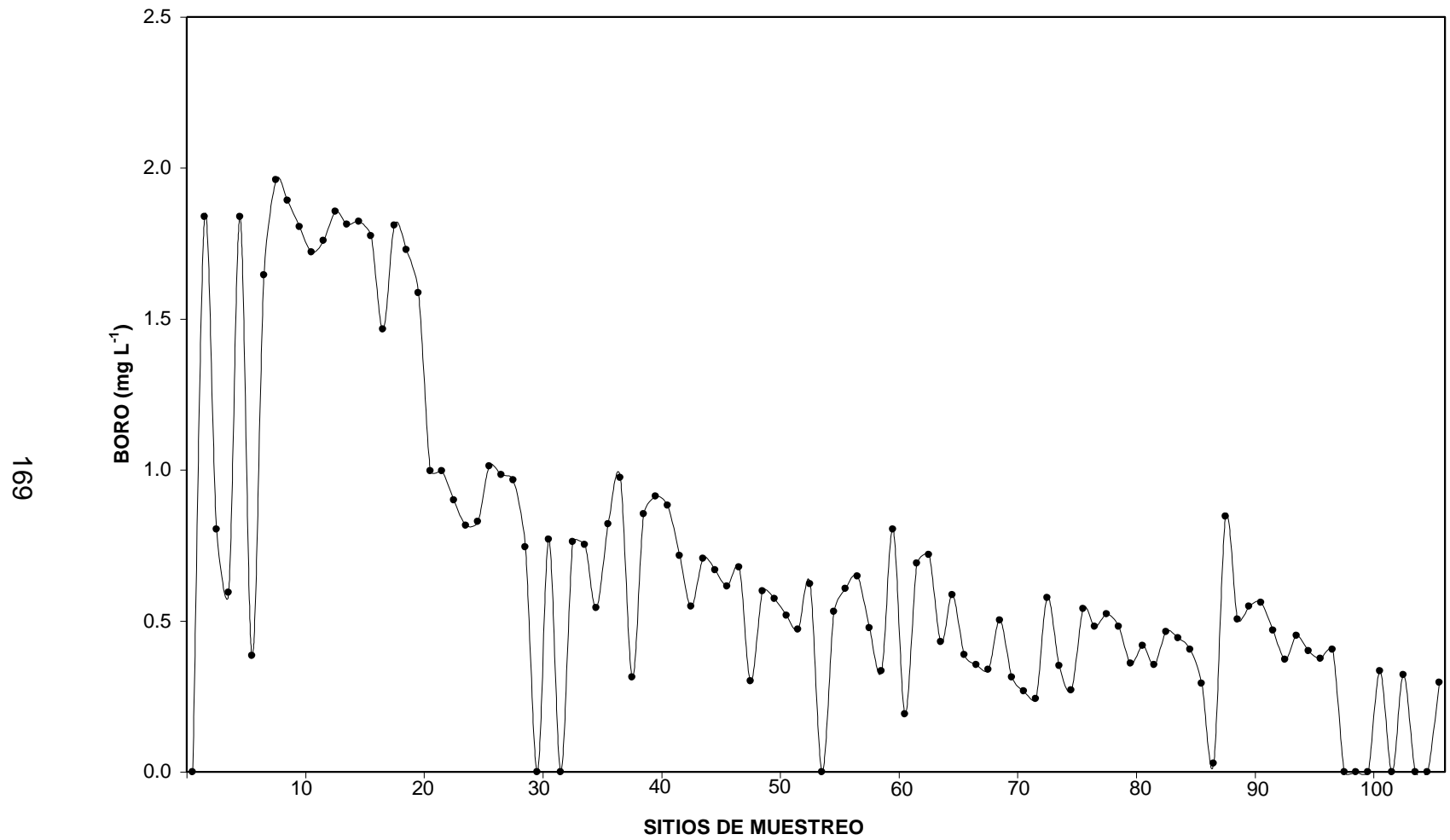


Figura 35. Concentración de Boro B (mg L<sup>-1</sup>) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1.

Cuadro 42. Clasificación del contenido de Boro de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. Buena (B); Condicionada (C) y No recomendable (NR).

No.	BORO		No.	BORO	
	mg L <sup>-1</sup>	Clasificación		mg L <sup>-1</sup>	Clasificación
01	1.86	C	51	0.57	C
02	8.77	NR	52	0.75	C
03	4.65	NR	53	0.70	C
04	1.54	C	54	0.74	C
05	4.06	NR	55	1.04	C
06	1.74	C	56	0.62	C
07	1.87	C	57	0.49	C
08	1.64	C	58	0.53	C
09	1.80	C	59	0.58	C
10	1.64	C	60	0.59	C
11	1.82	C	61	0.90	C
12	1.64	C	62	0.66	C
13	1.68	C	63	0.86	C
14	1.73	C	64	0.85	C
15	1.61	C	65	0.89	C
16	1.63	C	66	0.84	C
17	1.62	C	67	0.88	C
18	1.79	C	68	0.97	C
19	1.41	C	69	0.65	C
20	1.00	C	70	1.13	C
21	1.36	C	71	0.90	C
22	1.36	C	72	0.86	C
23	1.40	C	73	0.80	C
24	0.41	C	74	0.72	C
25	1.25	C	75	0.87	C
26	1.56	C	76	0.85	C
27	1.34	C	77	1.05	C
28	1.07	C	78	0.78	C
29	1.29	C	79	0.90	C
30	1.41	C	80	1.03	C
31	1.36	C	81	0.80	C
32	1.28	C	82	0.80	C
33	0.74	C	83	0.90	C
34	1.40	C	84	1.05	C
35	1.35	C	85	0.69	C
36	0.95	C	86	0.81	C
37	0.93	C	87	0.80	C
38	1.17	C	88	0.99	C
39	0.87	C	89	0.94	C
40	0.85	C	90	0.75	C
41	0.28	B	91	0.90	C
42	1.60	C	92	0.79	C
43	0.89	C	93	0.86	C
44	0.98	C	94	0.46	C
45	0.73	C	95	0.16	B
46	0.81	C	96	0.23	B
47	0.54	C	97	0.76	C
48	1.28	C	98	0.50	C
49	0.29	C	99	0.77	C
50	0.78	C	100	0.88	C
			MEDIANA	0.90	
			MEDIA	1.15	
			MODA	0.90	
			DESV. EST.	0.98	

Cuadro 43. Clasificación del contenido de Boro de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. Buena (B); Condicionada (C) y No recomendable (NR).

No.	BORO		No.	BORO	
	mg L <sup>-1</sup>	Clasificación		mg L <sup>-1</sup>	Clasificación
01	0.00	B	54	0.00	B
02	1.84	C	55	0.53	C
03	0.80	C	56	0.61	C
04	0.59	C	57	0.65	C
05	1.84	C	58	0.48	C
06	0.38	C	59	0.33	C
07	1.65	C	60	0.80	C
08	1.96	C	61	0.19	C
09	1.89	C	62	0.69	C
10	1.81	C	63	0.72	C
11	1.72	C	64	0.43	C
12	1.76	C	65	0.59	C
13	1.86	C	66	0.39	C
14	1.81	C	67	0.36	C
15	1.82	C	68	0.34	C
16	1.78	C	69	0.50	C
17	1.47	C	70	0.31	C
18	1.81	C	71	0.27	B
19	1.73	C	72	0.24	B
20	1.59	C	73	0.58	C
21	1.00	C	74	0.35	C
22	1.00	C	75	0.27	B
23	0.90	C	76	0.54	C
24	0.82	C	77	0.48	C
25	0.83	C	78	0.52	C
26	1.01	C	79	0.48	C
27	0.98	C	80	0.36	C
28	0.97	C	81	0.42	C
29	0.75	C	82	0.36	C
30	0.00	B	83	0.46	C
31	0.77	C	84	0.44	C
32	0.00	B	85	0.41	C
33	0.76	C	86	0.29	B
34	0.75	C	87	0.03	B
35	0.54	C	88	0.85	C
36	0.82	C	89	0.51	C
37	0.98	C	90	0.55	C
38	0.31	C	91	0.56	C
39	0.85	C	92	0.47	C
40	0.91	C	93	0.37	C
41	0.88	C	94	0.45	C
42	0.72	C	95	0.40	C
43	0.55	C	96	0.38	C
44	0.71	C	97	0.41	C
45	0.67	C	98	0.00	B
46	0.62	C	99	0.00	B
47	0.68	C	100	0.00	B
48	0.30	B	101	0.33	C
49	0.60	C	102	0.00	B
50	0.57	C	103	0.32	C
51	0.52	C	104	0.00	B
52	0.47	C	105	0.00	B
53	0.62	C	106	0.30	B
			MEDIANA	0.54	
			MEDIA	0.69	
			MODA	0.00	
			DESV. EST.	0.52	

Entre los desechos industriales contenidos en las aguas residuales urbano-industriales se encuentran varios elementos tóxicos, entre ellos, el boro, que en grandes cantidades es tóxico tanto para las plantas como para el ser humano. La mayor parte de los cultivos solo necesitan pequeñas cantidades de este elemento considerado como esencial, y son semitolerantes a  $2 \text{ mg L}^{-1}$ , los mas tolerantes, como la alfalfa, col, cebolla y nabo soportan  $4 \text{ mg L}^{-1}$ , no asi los frutales, que son sensibles a  $1 \text{ mg L}^{-1}$ . Sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos, la mayoría de aguas que riegan el Valle del Mezquital son condicionadas para el riego de acuerdo al contenido de boro.

Debemos tomar en cuenta la movilidad del boro en el suelo para saber sus efectos y los factores asociados a este movimiento, como son la textura del suelo, el pH y la humedad. Los suelos de textura gruesa, bien drenados, son pobres en boro, en cambio, los de textura fina tienden a retener el boro añadido durante mas tiempo; no implicando esto que las plantas absorban este elemento de las arcillas en cantidades mayores que las de las arenas, sino por el contrario. La relación entre el pH, calcio disponible, y el estado del boro no es bien conocida, sin embargo, se ha comprobado que los síntomas de deficiencia de boro están asociados a altos valores de pH y que el consumo de boro por las plantas se reduce si se incrementa el pH. Por otra parte, si hay una sobreproducción de cal se absorben grandes cantidades de calcio en relación al boro.

En muchos cultivos la deficiencia de boro es acelerado bajo condiciones de extrema sequía. De lo anterior, podemos concluir que si tenemos en el agua de riego concentraciones de boro tóxicas a los cultivos, se ve reducida su asimilación y ya que los suelos de estas aguas urbano-industriales contienen considerables cantidades de carbonatos, se inhibe el consumo de boro y aumenta el de calcio.

### 6.8.2 Fósforo

Los fosfatos son fertilizantes que se aplican a los suelos en forma de ortofosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). Y otra forma de fertilizantes de fósforo son los metafosfatos ( $\text{PO}_3^-$ ) y los pirofosfatos ( $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$ ) una vez que se han aplicado a los suelos los  $\text{PO}_3^-$  y los  $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$ , estas formas de fosfatos, se convierten en  $\text{PO}_4^{3-}$ . La forma soluble predominante del fósforo es  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y esencialmente todo el fósforo adsorbido por las raíces de las plantas es en esta forma<sup>6,106</sup>.

Los contenidos de ortofosfatos del Muestreo 1 se presentan en la Figura 36. El contenido de fosfatos, desde el sitio de muestreo cuatro, hasta el sitio de muestreo 40 a excepción del sitio de muestreo 17, el contenido de fosfatos es alto (23.27) y varió de 2.05 a 20  $\text{mg L}^{-1}$ . En los últimos sitios de muestreo el fosfato decrece paulatinamente. Esto es, con toda probabilidad debido, al consumo de fósforo por las algas que crecen en los canales de riego.

En el Muestreo 2 (Figura 37), el contenido de fosfatos varió de 0.71 a 34.61  $\text{mg L}^{-1}$  desde el sitio de muestreo dos hasta el sitio de muestreo 50, es a partir de este sitio de muestreo que el contenido de fosfatos decrece hasta la estación 106 con un contenido de fosfatos de 0.17 a 17.53  $\text{mg L}^{-1}$ . Otra vez aquí, se debe hacer hincapié que el decrecimiento del contenido de fosfatos a lo largo de toda la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán es debido al consumo de fosfatos por las algas que crecen en los canales de riego.

En las directrices para interpretar la calidad de las aguas para riego, Ayers y Wescot, 1987<sup>14</sup>, señalan que el contenido de fósforo como fosfato en las aguas de riego normales es de 0 a 2  $\text{mg L}^{-1}$ . En el Cuadro 44 de acuerdo a la clasificación del contenido de fosfatos para el Muestreo 1 solamente 14 de las muestras de agua residual se encuentran en los niveles óptimos recomendados para riego. Mientras que en el Muestreo 2 (Cuadro 45). 32 muestras de agua se encontraron dentro de los niveles recomendados para riego.

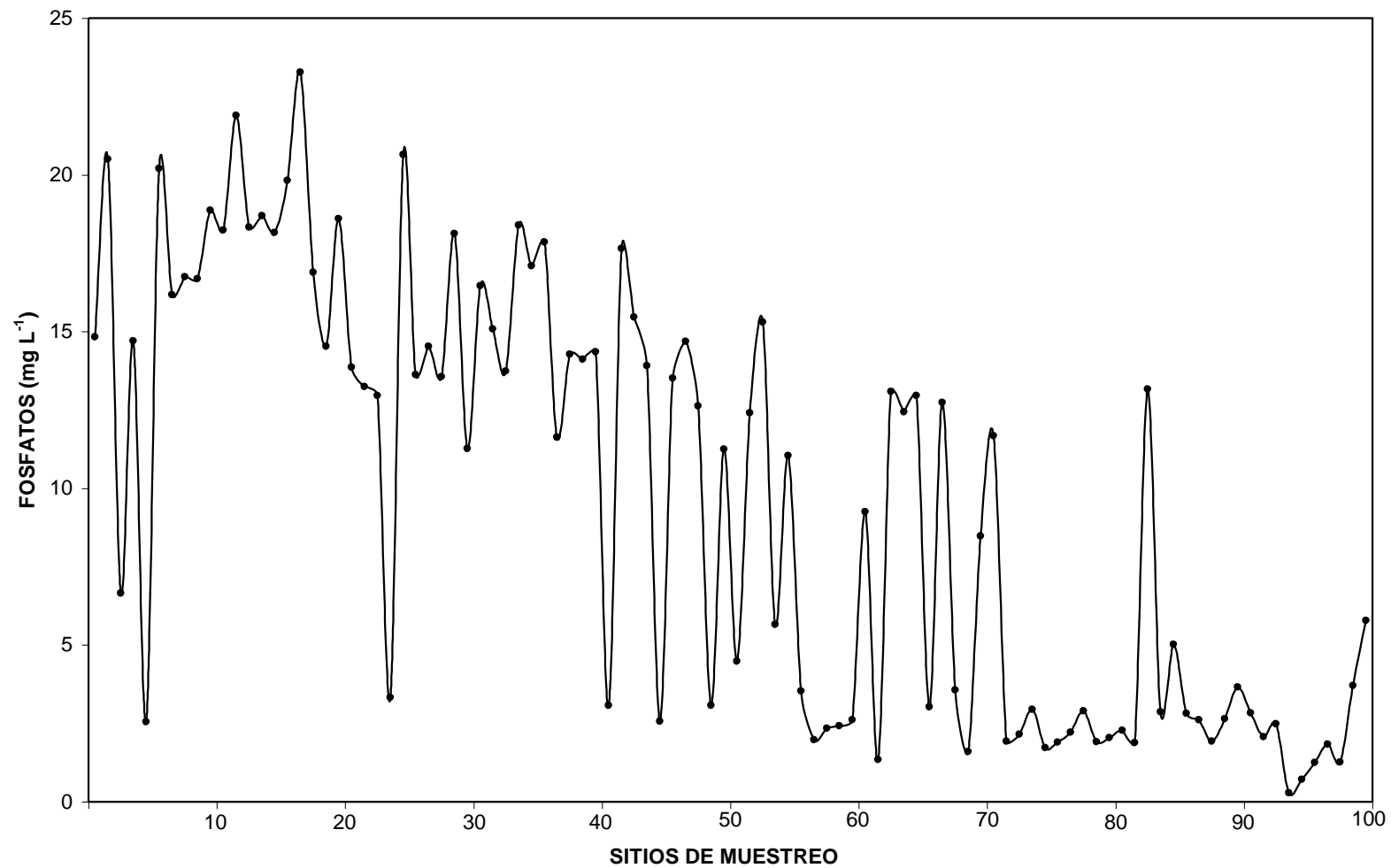


Figura 36. Concentración de fosfatos  $\text{PO}_4^{3-}$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1.

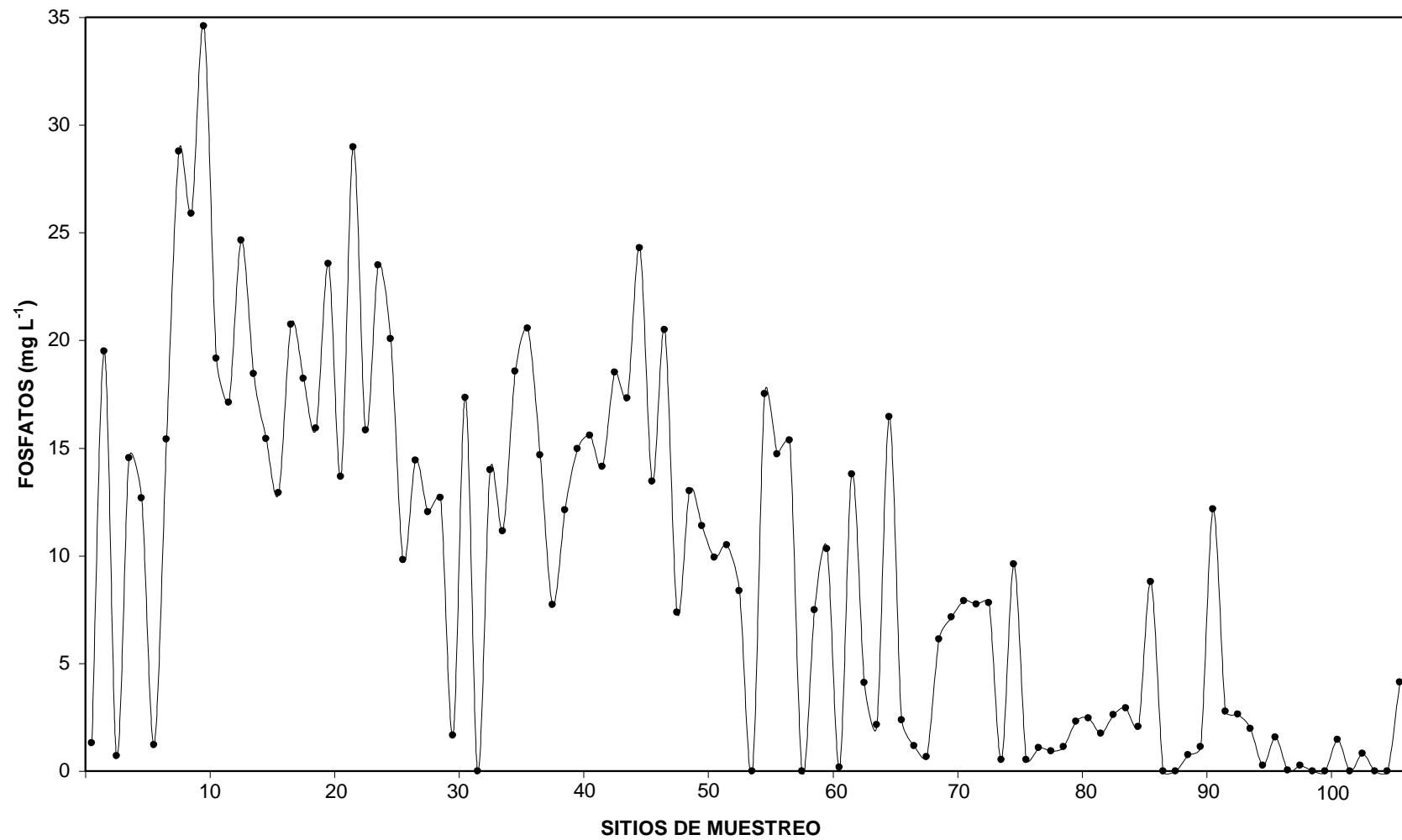


Figura 37. Concentración de fosfatos  $\text{PO}_4^{3-}$  ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2.



Cuadro 44. Clasificación del contenido de fosfatos determinados como ortofosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 1. Dentro de los niveles recomendados ( $\checkmark$ ); Fuera de los niveles recomendados (X).

No.	$\text{PO}_4^{3-}$		No.	$\text{PO}_4^{3-}$	
	mg L <sup>-1</sup>	Intervalo 0.0-2.0		mg L <sup>-1</sup>	Intervalo 0.0-2.0
01	14.83	X	51	4.49	X
02	20.50	X	52	12.41	X
03	6.66	X	53	15.30	X
04	14.70	X	54	5.65	X
05	2.55	X	55	11.05	X
06	20.20	X	56	3.54	X
07	16.18	X	57	1.98	$\checkmark$
08	16.74	X	58	2.34	X
09	16.69	X	59	2.42	X
10	18.87	X	60	2.62	X
11	18.23	X	61	9.26	X
12	21.90	X	62	1.35	$\checkmark$
13	18.33	X	63	13.09	X
14	18.70	X	64	12.44	X
15	18.15	X	65	12.96	X
16	19.82	X	66	3.03	X
17	23.27	X	67	12.73	X
18	16.89	X	68	3.57	X
19	14.52	X	69	1.60	$\checkmark$
20	18.60	X	70	8.47	X
21	13.87	X	71	11.67	X
22	13.24	X	72	1.93	$\checkmark$
23	12.96	X	73	2.15	X
24	3.32	X	74	2.95	X
25	20.64	X	75	1.72	$\checkmark$
26	13.63	X	76	1.90	$\checkmark$
27	14.52	X	77	2.22	X
28	13.56	X	78	2.90	X
29	18.13	X	79	1.91	$\checkmark$
30	11.26	X	80	2.05	X
31	16.46	X	81	2.28	X
32	15.09	X	82	1.89	$\checkmark$
33	13.73	X	83	13.16	X
34	18.40	X	84	2.86	X
35	17.10	X	85	5.03	X
36	17.85	X	86	2.82	X
37	11.63	X	87	2.62	X
38	14.28	X	88	1.93	$\checkmark$
39	14.12	X	89	2.65	X
40	14.36	X	90	3.66	X
41	3.07	X	91	2.83	X
42	17.65	X	92	2.07	X
43	15.47	X	93	2.48	X
44	13.91	X	94	0.28	$\checkmark$
45	2.56	X	95	0.72	$\checkmark$
46	13.51	X	96	1.25	$\checkmark$
47	14.69	X	97	1.84	$\checkmark$
48	12.62	X	98	1.26	$\checkmark$
49	3.07	X	99	3.71	X
50	11.25	X	100	5.78	X
			MEDIANA	11.44	
			MEDIA	9.65	
			MODA	14.52	
			DESV. EST.	6.79	

Cuadro 45. Clasificación del contenido de fosfatos determinados como ortofosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) de las aguas residuales, de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan-Zimapán, del Muestreo 2. Dentro de los niveles recomendados ( $\checkmark$ ); Fuera de los niveles recomendados (X).

No.	$\text{PO}_4^{3-}$		No.	$\text{PO}_4^{3-}$	
	mg L <sup>-1</sup>	Intervalo 0.0-2.0		mg L <sup>-1</sup>	Intervalo 0.0-2.0
01	1.30	$\checkmark$	54	0.00	$\checkmark$
02	19.49	X	55	17.53	X
03	0.71	$\checkmark$	56	14.73	X
04	14.55	X	57	15.36	X
05	12.68	X	58	0.00	$\checkmark$
06	1.23	$\checkmark$	59	7.49	X
07	15.41	X	60	10.32	X
08	28.78	X	61	0.17	$\checkmark$
09	25.88	X	62	13.79	X
10	34.61	X	63	4.10	X
11	19.16	X	64	2.15	X
12	17.12	X	65	16.46	X
13	24.65	X	66	2.38	X
14	18.47	X	67	1.18	$\checkmark$
15	15.44	X	68	0.68	$\checkmark$
16	12.92	X	69	6.14	X
17	20.74	X	70	7.15	X
18	18.24	X	71	7.90	X
19	15.93	X	72	7.75	X
20	23.57	X	73	7.83	X
21	13.69	X	74	0.54	$\checkmark$
22	28.99	X	75	9.62	X
23	15.82	X	76	0.54	$\checkmark$
24	23.50	X	77	1.09	$\checkmark$
25	20.08	X	78	0.94	$\checkmark$
26	9.82	X	79	1.14	$\checkmark$
27	14.43	X	80	2.31	X
28	12.04	X	81	2.47	X
29	12.71	X	82	1.74	$\checkmark$
30	1.66	$\checkmark$	83	2.62	X
31	17.34	X	84	2.93	X
32	0.00	$\checkmark$	85	2.06	X
33	14.00	X	86	8.79	X
34	11.15	X	87	0.00	$\checkmark$
35	18.57	X	88	0.00	$\checkmark$
36	20.56	X	89	0.77	$\checkmark$
37	14.68	X	90	1.12	$\checkmark$
38	7.72	X	91	12.16	X
39	12.12	X	92	2.78	X
40	14.98	X	93	2.65	X
41	15.59	X	94	1.97	$\checkmark$
42	14.15	X	95	0.26	$\checkmark$
43	18.53	X	96	1.58	$\checkmark$
44	17.32	X	97	0.05	$\checkmark$
45	24.30	X	98	0.26	$\checkmark$
46	13.47	X	99	0.00	$\checkmark$
47	20.50	X	100	0.00	$\checkmark$
48	7.37	X	101	1.46	$\checkmark$
49	13.01	X	102	0.00	$\checkmark$
50	11.40	X	103	0.82	$\checkmark$
51	9.92	X	104	0.00	$\checkmark$
52	10.50	X	105	0.00	$\checkmark$
53	8.36	X	106	4.13	X
				MEDIANA	9.20
				MEDIA	9.61
				MODA	0.00
				DESV. EST.	8.37

## 7. CONCLUSIONES

1. El valor del coeficiente (a) de la relación funcional  $\text{mg L}^{-1} = fa\text{CE}$  fue de  $a=0.7259$ . Este coeficiente corresponde a aguas de riego del tipo bicarbonatada.
2. El valor del coeficiente (a) de la relación funcional  $\text{PO}=fa\text{CE}$  fue de  $a=0.040$ , cuando la presión osmótica se expresa en MPa.
3. La exactitud de los análisis químicos se establece con las relaciones  $y=\text{CE}_{\text{teórica}}$  y  $x=\text{CE}_{\text{experimental}}$ . Las relaciones conjuntas de la  $\text{CE}_{\text{teórica}}$  ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )- $\text{CE}_{\text{experimental}}$  ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )=1.04. El intervalo de aceptación establecido por este método de comprobación de los datos analíticos es de  $0.9 < \text{CE}_{\text{teórica}}/\text{CE}_{\text{experimental}} < 1.1$ , lo cual nos indica que los datos analíticos obtenidos en este trabajo son correctos.
4. En 38% de los sitios del Muestreo 1, tienen una conductividad eléctrica de 1350-1800  $\mu\text{ S cm}^{-1}$  y 46% de los sitios del Muestreo, 2 tienen una conductividad eléctrica de 1160-1740  $\mu\text{ S cm}^{-1}$ . Lo cual indica que se presentaran condiciones de salinidad, si no se realiza un buen manejo de lo suelos
5. Las predicciones del porcentaje de sodio intercambiable, cuando se utilizaron diferentes formulaciones de RAS fueron; 1.  $\text{RAS}_{\text{or}}=10$  y  $\text{kg}=0.011861$  se obtuvo un  $\text{PSI}=10.60$ ; 2.  $\text{RAS}_{\text{aj}}=10$  y  $\text{kg}=0.007244$  se

obtuvo un  $PSI=6.76$ ; y 3.  $RAS^0=10$  y  $kg=0.0168999$  se obtuvo un  $PSI=14.46$ .

6. La determinación de las sales hipotéticas señala que las aguas urbano-industriales que riegan el Valle del Mezquital son sódico-clorhídrico-bicarbonatadas.
7. Las sales hipotéticas que predominan en las aguas residuales urbano-industriales son:  $NaCl > NaHCO_3 > Mg(HCO_3)_2 > Ca(HCO_3)_2 > MgSO_4$ .
8. De acuerdo con los contenidos de boro, en 94 muestras del Muestreo 1 y 89 muestras del Muestreo 2, son aguas condicionadas para riego.
9. En base con los contenidos de ortofosfatos ( $PO_4^{3-}$ ), en 86 muestras del Muestreo 1 y 74 muestras del Muestreo 2, son aguas no recomendadas para riego.
10. Los contenidos de  $CSR > 2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  en 54 muestras del Muestreo 1 y en 74 muestras del Muestreo 2, indican que son aguas no recomendables para riego.

## 8. RECOMENDACIONES

Si se considera que los suelos del Valle del Mezquital son de diferentes tipos, con propiedades físico-químicas muy variadas, y que también a su vez, estos suelos poseen diferentes espesores litológicos, entonces se hace evidente, que para diseñar las dosis apropiadas de mejoradores químicos que contengan como fuente iones de calcio, se tiene que tomar en cuenta la determinación de valores máximos y mínimos del porcentaje de sodio intercambiable en los suelos.

De ahí que entonces se recomienda ampliamente la determinación de los valores de la relación de adsorción de sodio en sus diferentes formulaciones como son:  $RAS_{or}$ ,  $RAS_{aj}$  y  $RAS^0$ .

## 9. LITERATURA CITADA

1. Abbas, S. T., M. Sarfraz, S. M. Mehdi, G. Hassan, and Obaid-Ur-Rehman. 2007. Trace Elements Accumulation in Soil and Rice Plants Irrigated with Contaminated Water. *Soil & Tillage Research*. 94:503-509.
2. Abdel, G. G., A. Arslan, A. Gaihbe, and F. Kadouri. 2005. The Effects of Saline Irrigation Water Management and Sal Tolerant Tomato Varieties on Sustainable Production of Tomato in Syria (1999-2002). *Agric. Water Manage.* 78:39-53.
3. Aceves N., E. y V. Palacios O. 1970. Instructivo para el muestreo, registro de datos e interpretación de la calidad del agua para riego agrícola. Colegio de Postgraduados. Chapingo.
4. Adams, F. 1971. Ionic Concentrations and Activities in Soil Solutions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35:420-426.
5. Akhter, J., R. Murray, K. Mahmood, K. A. Malik, and S. Ahmed. 2004. Improvement of Degraded Physical Properties of a Saline-Sodic Soil by Reclamation with Kallar Grass (*Leptochloa fusca*). *Plant and Soil*. 258:207-216.
6. Akinremi, O. O., and C. M. Cho. 1991. Phosphate and Accompanying Cation Transport in a Calcareous Cation-Exchange Resin System. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:959-964.
7. Alhammadi, M. S., and D. M. Millar. 2006. Effect of Ionic Strength and Sodium Adsorption Ratio on the Flocculation/Dispersion of Two Surface Soils from Eastern Arkansas. *Soil Sci.* 171(12):960-967.
8. Al-Shammiri, M., A. Al-Saffar, S. Bohamad, and M. Ahmed. 2005. Waste Water Quality and Reuse in Irrigation in Kuwait Using Microfiltration Technology in Treatment. *Desalination*. 185:213-225.
9. American Public Health Association. 1989. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 17<sup>th</sup> edition. APHA, AWWA, WEF. Edition Port City Press, Baltimore, Maryland.
10. Amezketa, E. 2007. Use of an Electromagnetic Technique to Determine Sodicity in Saline-Sodic Soils. *Soil Use and Management*. 23:278-285.

11. Amrhein, C., and D. L. Suarez. 1991. Sodium-Calcium Exchange with Anion Exclusion and Weathering Corrections. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:698-706.
12. Arora, Y., and N. T. Singh. 1980. Effect of Amount of Leaching Water and Method of Calcium Application on the Reclamation of a Saline Sodic Soil. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 28(2):219-222.
13. Arora, Y., M. R. Chaudhary, and N. T. Singh. 1981. Dissolution Rate of Gypsum in Sodic Soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 29(3):361-365.
14. Ayers, R. S., and D. W. Westcot. 1987. *La calidad del agua en la agricultura. Traducido al español por J. F. Alfaro. Estudio FAO Riego y Drenaje 29 Rev. 1.* Roma.
15. Bajwa, M. S., O. P. Choudhary, and A. S. Josan. 1992. Effect of Continuous Irrigation with Sodic and Saline-Sodic Waters on Soil Properties and Crop Yields under Cotton-Wheat Rotation in Northwestern India. *Agric. Water Manage.* 22:345-356.
16. Baruah, T. C., R. Pal., S. R. Poonia and R. S. Siyag. 1983. Exchange Equilibria of Sodium *versus* Calcium and Potassium in Some Aridisols. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 31:394-402.
17. Beletse, Y. G., J. G. Annandale, J. M. Steyn, I. Hall, and M. E. Aken. 2008. Can Crops be Irrigated with Sodium Bicarbonate Rich CBM Deep Aquifer Water? Theoretical and Field Evaluation. *Ecol. Eng.* 1-11.
18. Bhardwaj, A. K., U. K. Mandal, A. Bar-Tal, A. Gilboa, and G. J. Levy. 2008. Replacing Saline-Sodic Irrigation Water with Treated Wastewater: Effects on Saturated Hydraulic Conductivity, Slaking, and Swelling. *Irrig. Sci.* 26:139-146.
19. Bingham, F. T. 1982. *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties, Agronomy Monograph No. 9. (2nd Edition)- pp 431-447.*
20. Bower, C. A. 1959. Cation-Exchange Equilibria in Soils Affected by Sodium Salts. *Soil Sci.* 88:32-35.
21. Bower, C. A., G. Ogata, and J. M. Tucker. 1968. Sodium Hazard of Irrigation Waters as Influenced by Leaching Fraction and by Precipitation or Solution of Calcium Carbonate. *Soil Sci.* 106(1):29-34.

22. Bower, C. A., L. V. Wilcox, G. W. Akin, and M.G. Keyes. 1965. An Index of the Tendency of  $\text{CaCO}_3$  to Precipitation from Irrigation Waters, Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 29:91-92
23. Bower, C.A., and J. O. Goertzen. 1955. Negative Adsorption of Salts by Soils. Soil Sci. Soc. Proc. 19:147-151.
24. Carmassi, G., L. Incrocci, R. Maggini, F. Malorgio, F. Tognoni, and A. Pardossi. 2007. An aggregated Model for Water Requirements of Greenhouse Tomato Grown in Closed Rockwool Culture with Saline Water. Agric. Water Manage. 88:73-82.
25. Causapé, J., L. Auqué, Ma. J. Gimeno, J. Mandado, D. Quilez, and R. Aragües. 2004. Irrigation Effects on the Salinity of the Arba and Riguel Rivers (Spain); Present Diagnosis and Expected Evolution Using Geochemical Models. Env. Geol. 45:703-715.
26. Chahal, R. S., and R. N. Kundu. 1985. Ameliorating Effects of Pyrites as Influenced by  $\text{CaCO}_3$  in Saline Sodic Soils. J. Indian Soc. Soil Sci. 33:635-640.
27. Chauhan, C. P. S., and B. R. Tripathi. 1983. Reclamation Studies on Highly Saline-Sodic Soil of Semi-arid Tract in Uttar Pradesh. J. Indian Soc. Soil Sci. 31:587-595.
28. Chawla, K. L., and I. P. Abrol. 1982. Effect of Gypsum Fineness and Method of Incorporation on Reclamation of Sodic Soils. J. Indian Soc. Soil Sci. 30(3):348-352.
29. Choudhary, O. P. B., S. Ghuma, A. S. Josan, and M. S. Bajwa. 2006. Effect of Alternating Irrigation with Sodic and Non-Sodic Water on Soil Properties and Sunflower Yield. Agric. Water Manage. 85:151-156
30. Choudhary, O. P., A. S. Josan, and M. S. Bajwa. 2001. Yield and Fibre Quality of Cotton Cultivars as Affected by the Build-up of Sodium in the Soils with Sustained Sodic Irrigations under Semi-Arid Conditions. Agricultural Water Management. 49:1-9.



31. Cifuentes E., Bluentha U., G. Ruiz-Palacios G. Bennett S., y A. Peasey. 1994. Escenario epidemiológico del uso agrícola del agua residual: El Valle del Mezquital, México. *Salud Pública*. 36(1):3-9.
32. Comisión Nacional del Agua. 1995. Propuesta para la creación del centro de estudios sobre uso de aguas residuales en el Valle del Mezquital. México, D. F. Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Gerencia Regional de Aguas del Valle de México.
33. Coras M., P. M. 2000. Calidad química del agua para riego. Universidad Autónoma Chapingo. Fitotecnia. Texcoco, Edo. de México.
34. Crosbie, R. S., J. D. Hughes, J. Friend and B. J. Baldwin. 2007. Monitoring the Hydrological Impact of Land use Change in a Small Agricultural Catchment Affected by Dryland Salinity in Central NSW, Australia. *Agric. Water Manage.* 88:43-53.
35. Deo, Ch., and P. Lal. 1982. Effect of Water Quality and Moisture Regime on Soil Properties and Yield of Mustard and Taramira (*Eruca sativa*). *J. Indian Soc. Soil Sci.* 30(3):411-414.
36. Doering, E. J., and W. O Willis. 1980. Effect of Soil Solution Concentration on Cation Exchange Relationships. *Proc. Inter. Symp. On Salt-Affected Soils.* Karnal, India.
37. Doneen, L. D. 1975. Water Quality for Irrigated Agricultural. *In: A. Poljakoff, Mayber A., and J. Gale (eds.). Plant in Saline Environments.* Springer-Verlang. New York. U. S. A.
38. Eaton, F. M. 1950. Significance of Carbonates in Irrigation Waters. *Soil Sci.* 69:123-133.
39. Endo, T., S. Yamamoto, T. Honna, and E. Eneji. 2002. Sodium-Calcium Exchange Selectivity as Influenced by Clays Minerals and Composition. *Soil Sci.* 167(2):117-125.
40. Evangelou, V. P., and F. J. Coale. 1987. Dependence of the Gapon Coefficient on Exchangeable Sodium for Mineralogically Different Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:68-72.
41. Evangelou, V. P., and R. E. Phillips. 1987. Sensitivity Analysis on the Comparison between the Gapon and Vanselow Exchange Coefficients. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:1473-1479.

42. Evangelou, V. P., and M. Marsi. 2003. Influence of Ionic Strength on Sodium-Calcium Exchange of Two Temperature Climate Soils. *Plant and Soil*. 259:307-313.
43. Fox, R. H. 1968. The Effect of Calcium and pH on Boron Uptake from High Concentrations of Boron by Cotton and Alfalfa. *Soil Sci*. 106(6):435-439.
44. Frenkel, H., and N. J. Alperovitch. 1984. The Effect of Mineral Weathering and Soil Solution Concentration on ESR-SAR Relationships of Arid and Semi-Arid Zone Soils from Israel. *J of Soil Sci*. 35:367-372.
45. Frenkel, H., A., and W. A. Hadas. 1978. The Effect of Salt Precipitation and High Sodium Concentrations on Soil Hydraulic Conductivity and Water Retention. *Water Resour. Res*. 14:217-221.
46. Gorbunov, N. I. 1967. Pochbieni y Koloidiy I ij Srachenice dlia plodo Rodya. Izdatielstvo Nauta. Moscú (En Ruso).
47. Goyal, R. S., and B. L. Jain. 1982. Use of Gypsum in Modifying Crust Conductive Conditions in Saline Water Irrigated Soils. *J. Indian Soc. Soil Sci*. 30(4):447-454
48. Grattan, S. R., and C. M. Grieve. 1994. Mineral Nutrient and Response by Plants Grown in Saline Environments. pp. 203-226. *In*: M. Pessarakly (ed.) *Handbook of Plant and Crops Stress*. Marcel Decker Inc. New York.
49. Greenberg, A. E. 1992. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 18<sup>th</sup> edition. APHA, AWWA, WEF.
50. Griffin, R. A., and J. J. Jurinak. 1973. Estimation of Activity Coefficients from the Electrical Conductivity of Natural Aquatic Systems and Soil Extracts. *Soil Sci*. 116(1):26-30.
51. Guerasimov, Ya., V. Dreving, E. Eriomin, A. Kiseliov, V. Lebeder, G. Panchenkov, and A. Shliguin. 1971. Teoría de los electrolitos. Traducción al español de González Marín Salvador. pp. 404-432 *In*: *Curso de Química Física*. Cap. 16. Tomo II. Editorial MIR. Moscú.
52. Gupta, I. C. 1983. Concept of Residual Sodium Carbonate in Irrigation Waters in Relation to Sodic Hazard in Irrigated Soils. *Curr. Agric*. 7(3/4):97-113.

53. Gupta, U. C., Y. W. Jame, C. A. Cambell, A. J. Leyshon, and W. Nicholaichuk. 1985. Boron Toxicity and Deficiency: A Review. *Can. J. Soil Sci.* 65(3):381-409.
54. Harron, W. R. A., G. R. Webster, and R. R. Cairns. 1983. Relationship between Exchangeable Sodium and Sodium Adsorption Ratio in a Solonetzic Soil Association. *Can. J. Soil Sci.* 63:461-467.
55. Harwad, M. E., and N. T. Coleman. 1953. Ion Exchange Equilibria on the Presence of Small Amounts of Electrolyte. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 17:339-342.
56. Hivakumaraswamy, K. S., and T. Satyanarayana. 1982. Effect of Soil Compaction and Solution Composition on Hydraulic Conductivity. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 30(2):200-201.
57. Hoffman, G. J., R. S. Ayers, E. J. Doering, and B. L. Mc Neal. 1990. Salinity in Irrigated Agriculture. pp. 145-185. *In: Agricultural Irrigation. Chapter 5. Agronomy Monograph No. 30. Madison.*
58. Hussain, M., S. M. Ahmed, and W. Abderrahman. 2008. Cluster Analysis and Quality Assessment of Logged Water at an Irrigation Project, Eastern Saudi Arabia. *J. Environ Manage.* 86:297-307.
59. INEGI. 1992. *Síntesis Geográfica del Estado de Hidalgo. México.*
60. INIFAP. 1990. *Análisis de la problemática del agua y perspectivas para la modernización de su uso en la agricultura de Guanajuato. Centro de investigaciones forestales y agropecuarias de Guanajuato. Campo experimental bajo. Celaya Guanajuato.*
61. Jalali, M. 2006. Chemical Characteristics of Groundwater in Parts of Mountainous Region, Alvand, Hamadan. *Iran. Environ. Geol.* 51:433-366.
62. Jalali, M. 2007. Salinization of Groundwater in Arid and Semiarid Zones: an Example from Tajarak, Western Iran. *Environ. Geol.* 52:1133-1149.
63. Jalali, M., H. Merikhpour, M. J. Kaledhonkar, and S. E. A. T. M. Van Der Zee. 2008. Effects of Wastewater Irrigation on Soil Sodicity and Nutrient Leaching in Calcareous Soils. *Agric. Water Manage.* 95:143-153.

64. James, D. W., M. R. J. Hanks and J. J. Jurinak. 1982. Modern Irrigated Soils. Wile-Interscience Publication. U.S. A.
65. James, W. B., R. K. R. Hershberger, and L. S. Browning. 2008. Soil Solution and Exchange Complex Response to Repeated Wetting-Drying with Modestly Saline-Sodic Water. *Irrig. Sci.* 26:121-130.
66. Jurinak, J. J., and D. L. Suarez. 1990. The Chemistry of Salt-Affected Soils and Waters. pp. 42-63. *In: Tanji, K. K. (ed). Agricultural Salinity Assessment and Management. Chapter 3. ASCE. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Published by American Society of Civil Engineers. New York.. U. S. A.*
67. Jurinak, J. J., C. Amrhein, and R. J. Wagenet. 1984. Sodic Hazard: The Effect of SAR and Salinity and Overburden Materials. *Soil Sci.* 138(3):142-159.
68. Kaledhonkar, M. J., and A. K. Keshari. 2006a. Modelling the Effects of Saline Water use in Agriculture. *Irrig. Drain.* 55(2):177-190.
69. Kaledhonkar, M. J., and A. K. Keshari. 2006b. Regional Salinity Modeling for Conjunctive Water use Planning in Kheri Command. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE.* 132 (4):389-398.
70. Kaledhonkar, M. J., A. K. Keshari, and S. E. A. T. M. Van Der Zee. 2006. Relative Sensitive of ESP Profile to Spatial and Temporal Variability in Cation Exchange Capacity and Pore Water Velocity under Simulated Field Conditions. *Agric. Water Manage.* 83(172):58-68.
71. Kaledhonkar, M. J., N. K. Tyagi, and S. E. A. T. M. Van Der Zee. 2001. Solute Transport Modelling in Soil for Irrigation Field Experiments with Alkali Water. *Agric. Water Manage.* 51:153-171.
72. Kelley, W. P. 1963. Use of Saline Irrigation Water. *Soil Sci.* 95:385-391.
73. Keren, R., and S. Miyamoto. 1990. Reclamation of Saline, Sodic, and Boron-Affected Soils. pp. 410-431 *In: Tanji, K. K. (ed) Agricultural Salinity Assessment and Management. Chapter 19. ASCE. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Published by American Society of Civil Engineers. New York. U. S. A.*

74. Kopittke, P. M., H. B. So, and N. Menzies. 2006. Effect of Ionic Strength and Clay Mineralogy on Na-Ca Exchangeable and the SAR-ESP Relationship. *Euro. J. Soil Sci.* 57:626-633.
75. Kovda, V. A., C. Vanden Berg C., and R. M. Hogan. 1967. International Source Book on Irrigation and Drainage of Arid Lands in Relation to Salinity and Alkalinity. FAO/UNESCO.
76. Kumar, U. M., A. K. Bhardwaj, D. N. Warrington, D. Goldstein, A. T. Bar and G. J. Levy. 2008. Changes in Soil Hydraulic Conductivity, Runoff, and Soil Loss due to Irrigation with Different Types of Saline-Sodic Water. *Geoderma.* 144:509-516.
77. Langelier, W. F. 1936. The Analytical Control of Anti-Corrosion Water Treatment. *J. Am. Water Works Assn.* 28(10):1500-1521.
78. Läuchli, A., and E. Epstein. 1990. Plant Responses to Saline and Sodic Conditions. pp. 42-63. *In: Tanji, K. K. (ed.). Agricultural Salinity Assessment and Management. Chapter 6. ASCE. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Published by American Society of Civil Engineers. New York. U. S. A.*
79. Leffelaar, P. A., A. Kamphorst, and R. Pal. 1983. Nomographic Estimation of Activity Coefficients from the Electrical Conductivity Data of Soil Extracts. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 31:20-27.
80. Letey, J., and G. L. Feng. 2007. Dynamic Versus Steady-State Approaches to Evaluate Irrigation Management of Saline Waters. *Agric. Water Manage.* 91:1-10.
81. Levy, G. J., A. I. Mamedov, and Goldstein. 2003. Sodicity and Water Quality Effects on Slaking of Aggregates from Semi-Arid Soils. *Soil Sci.* 168(8):552-562.
82. Levy, G. J., N. Sharshekeev and G. L. Zhuravskaya. 2002. Water Quality and Sodicity Effects on Soil Bulk Density and Conductivity in Interrupted Flow. *Soil Sci.* 167(10):692-700.
83. Levy, R., J. Shalhevet, and N. Alperovhitch. 1972. Selectivity Coefficients of Ca-Mg Exchange for three Montmorillonitic Soils. *Geoderma.* 8:133-138.

84. Li, Q. S., L. S. Willardson, L. X. Li, C. J. Liu, and L. Z. Wu. 2004. Amelioration of Saline-Sodic Soil with Mildly Saline Water in the Songnen Plain, Northeast China. *Soil Use and Management*. 20:439-443.
85. Maas, E. V., and G. J. Hoffman. 1977. Crop Salt Tolerante-Current Assessment. *J. Irri. Drain. Div. ASCE*. 103:115-134.
86. Mali, G. C., B. R. Chhipa, P. Lal, and P. C. Kanthaliya. 1982. Effect of Ca/Mg Ratio of Irrigation Water on Wheat Grown on a Loamy Sand Soil. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 30(3):418-420.
87. Manchanda, H. R., and J. P. Singh. 1982. Wheat Growth in Chloride and Sulphate Dominant Saline Soils and the Effect of Phosphorus Application. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 30(1):53-57.
88. Manchanda, H. R., and K. L. Chawla. 1931. Salt Profile Variations and Wheat Growth under Irrigation with Highly Saline Waters on Course Loamy Soils in South-Western Haryana. *J. Indian Soil Sci.* 29(4):504-511.
89. Manchanda, H. R., R. N. Garg, S. K. Sharma, and J. P. Singh. 1985. Effect of the Continuous Use of Sodium and Bicarbonate-Rich Irrigation Water with Gypsum and Farmyard Manure on Soil Properties and the Yield of Wheat in a Fine Loamy Soil. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 33:876-883.
90. Manchanda, H. R., S. L. Verma, and S. S. Khanna. 1982. Identification of Some Factors for Use of Sodic Waters with High Residual Sodium Carbonate. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 30(3):353-360.
91. Martínez J. 1986. Drenaje agrícola. Volumen 1. Edición del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España.
92. McNeal, B. L. 1968. Prediction of the Effect of Mixed-Salt Solutions on Soil Hydraulic Conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32:190-193.
93. Minhas, P. S., R. K. Naresh, C. P. S. Chauhan, and R. K. Gupta. 1994. Field determined Hydraulic Properties of a Sandy Loam Soil Irrigates with Various Salinity and SAR. *Agric. Water Manage.* 25:97-108.
94. Mohamed, S. A., and D. M. Miller. 2006. Effect of Ionic Strength and Sodium Adsorption Ratio on the Flocculation/Dispersion of Two Surface Soils from Eastern Arkansas. *Soil Sci.* 171(12):960-967.

95. Munns, R., and M. Tester. 2008. Mechanisms of Salinity Tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59:651-681.
96. Murtaza, G., A. Ghafoor, and M. Qadir. 2006. Irrigation and Soil Management Strategies for Using Saline-Sodic Water in a Cotton-Wheat Rotation. *Agric. Water Manage.* 81:98-114.
97. Nadler, A., and M. Magaritz. 1981. Expected Desviations from the ESP-SAR Empirical Relationships in Calcium and Sodium-Carbonate-Containing Arid Soils: Field Evidence. *Soil Sci.* 131(4):220-225.
98. Naidu, R., and P. Rengasamy. 1993. Ion Interaction and Constraints to Plant Nutrition in Australian Sodic Soils. *Aust. J. Soil Sci.* 31:801-819.
99. Negi, A. S., and A. B. Ghosh. 1980. Irrigation Water Quality of the Cold and Arid Region in Himachal Pradesh. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 28(3):410-411.
100. Ortega M., Y. M. y Ma. J. S. Cíntora G. 2005. Boro, fósforo e índices de salinidad en las aguas residuales para riego agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo. Tesis de Licenciatura en Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. México, D.F.
101. Ortega E., M. 1993. Causas del ensalitramiento y su efecto sobre los suelos. Colegio de Postgraduados. Centro de Hidrociencias. Montecillo, Estado de México.
102. Oster, J. D., and G. Sposito. 1980. The Gapon Coefficient and the Exchangeable Sodium Percentage-Sodium Adsorption Ratio Relation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:258-260.
103. Oster, J. D., and B. L. McNeal. 1971. Computation of Soil Solution Composition Variation with Water Content for Desaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35:436-442.
104. Ould Ahmed, B. A., T. Yamamoto, V. Rasiyah, M. Inoue, and H. Anyoji. 2007. The Impact of Saline Water Irrigation Management Options in Dune Sand on Available Soil Water and its Salinity. *Agric. Water Manage.* 88:63-72.
105. Pal, B., and B. R. Tripathi. 1982. Effect of EC and SAR of Water on Wheat and Barley Grown on Different Textured Soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 30(3):421-423.

106. Pal, B., and U. V. Singh. 1985. Effect of Phosphorus on Yield and Nutrient Content in Berseem (*Trifolium alexandrinum* L.) Irrigated with Saline Waters. J. Indian Soc. Soil Sci. 33:646-653.
107. Paliwai K. V., and A. P. Gandhi. 1976. Effect of salinity, SAR, Ca:Mg Ratio in Irrigation Water, and Soil Texture on the Predictability of Exchangeable Sodium Percentage. Soil Sci. 122(2):85-90.
108. Pescod, M. B. 1992. Wastewater Treatment and Use in Agricultural. pp.114-117. Irrigation and drainage. Paper 47. FAO. Rome.
109. Pizarro F. 1985. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. 2ª edición. Editorial Agrícola Española. Madrid, España.
110. Ponnampereuma, F. N., E. M. Tianco, and T. A. Loy. 1966. Ionic Strengths of the Solutions of Flooded Soils and Other Natural Aqueous Solutions from Specific Conductance. Soil Sci. 102(6):408-413.
111. Porcelli, A. C., F. H. G. Boem and R. S. Lavado. 1995. The K/Na and Ca/Na Ratios and Rapseed Yield, under Soil Salinity and Sodcity. Plant and Soil. 175:251-255.
112. Prasad, A., D. Kumar, and D. V. Singh. 2001. Effect of Residual Sodium Carbonate in Irrigation Water on the Soil Sodification and Yield of Palmarosa (*Cymbopogon martinni*) and Lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*). Agric. Water Manage. 50:161-172.
113. Pratt, P. F., and D. L. Suarez. 1990. Irrigation Water Quality Assessments. pp. 220-236. In: Tanji, K. K. (ed.). Agricultural Salinity Assessment and Management. Chapter 11. ASCE. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Published by American Society of Civil Engineers. New York. U. S. A.
114. Pratt, P. F., and L. F. Bair. 1969. Sodium Hazard of Bicarbonate Irrigation Waters. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 33:880-883.
115. Pratt, P. F., L. D. Whittig, and B. L. Grover. 1962. Effect of pH on the Sodium-Calcium Exchange Equilibria in Soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 26:227-230.



116. Rahil, M. H., and V. Z. Antonopoulos. 2007. Simulating Soil Water Flow and Nitrogen Dynamics in a Sunflower Field Irrigated with Reclaimed Wastewater. *Agric. Water Manage.* 92:142-150.
117. Rao, T. S., A. L. Page, and N. T. Coleman. 1968. The Influence of Ionic Strength and Ion-Pair Formation between Alkaline Earth Metals and Sulfate on Na-Divalent Cation-Exchange Equilibria. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32:639-643.
118. Rathore, G. S., R. S. Khamparia, G. P. Gupta, and S. B. Sinha. 1980. Correlation Study of Water Soluble Boron with E<sub>Ce</sub> and Silt plus Clay in Non-Saline and Low Saline Soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 28(2):251-253.
119. Reeve, R. C., and G. H. Tamaddoni. 1965. Effect of Electrolyte Concentration on Laboratory Permeability and Field Intake Rate of a Sodic Soil. *Soil Sci.* 99(4):261-266.
120. Rhoades, J. D. 1972. Quality of Water for Irrigation. *Soil Sci.* 113(4):277-284.
121. Rhoades, J. D., and D. B. Krueger. 1968. Extraction of Cations from Silicate Mineral during the Determination of Exchangeable Cations in Soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32:488-492.
122. Rhoades, J. D., A. Kandiah, and A. M. Mashali. 1992. The Use of Saline Waters for Crop Production. FAO. Irrigation and Drainage Paper No. 58. Rome.
123. Rhoades, J. D., F. Chaundi and S. Lesch. 1999. Soil Salinity Assessment. Methods and Interpretation of Electrical Conductivity Measurements. Irrig. and Drain. Paper 57. FAO. Rome.
124. Rhue, R. D., and R. S. Mansell. 1988. The effect of pH on Sodium-Calcium and Potassium-Calcium Exchange Selectivity for Cecil Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:641-647.
125. Richard, H. F. 1968. The Effect of Calcium and pH on Boron Uptake from High Concentrations of Boron by Cotton and Alfalfa. *Soil Sci.* 106(6):435-439.
126. Richards, L. A. 1973. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sodicos. Manual No. 60. Editorial LIMUSA.

127. Rodier, J. 1978. Análisis de las aguas. Editorial Omega. Barcelona, España. pp. 159-197.
128. Rodvang, S. J., D. M. Mikalson, and M. C. Ryan. 2004. Changes in Ground Water Quality in an Irrigated Area of Southern Alberta. *J. Environ. Qual.* 33:476-487.
129. Rutkwski, T. L., Raschid-Sally and S. Buechler. 2007. Wastewater Irrigation in the Developing World-Two Case Studies from the Jathmandu Valley in Nepal. *Agric. Water Manage.* 88:83-91.
130. Ryan, J., S. Miyamoto, and J. L. Stroehlein. Short Communication. 1977. Relation of Solute and Sorbed Boron to the Boron Hazard in Irrigation Water. *Plant and Soil.* 47:253-256.
131. Salinity Laboratory Staff. U. S. 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. U. S. Dept. Agric. Handbook 60. U. S. Washington, DC.
132. Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), y Universidad Autónoma Chapingo (UACh). 1997. Propuesta técnica del programa de desarrollo regional sustentable "Valle del Mezquital" Hidalgo. México. Dirección General de Programas Regionales. México.
133. Sharma, D. P. 1985. Evaluation of Water Infiltration Characteristics during the Reclamation of Sodic Soils. Short Communications. *J. Indian Soil Sci.* 33:893-895.
134. Sharma, D. R, and P. S. Minhas. 1998. Effect of Irrigation with Sodic Waters of Varying EC, RSC and SAR/adj. SAR on Soil Properties and Yield of Cotton-Wheat. *J. Indian Soc Soil Sci.* 46(1):116-119.
135. Sharma, M. K., S. R. Poonia, R. K. Gupta, and R. S. Siyag. 1994. Sodicity of Irrigation Waters in Relation to Precipitation/Dissolution of CaCO<sub>3</sub>. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 42(2):244-247.
136. Singh, Ch., M. R. Chaudhary, Y. Arora, and N. T. Singh. 1980. Effect of Different Concentrations of Gypsum Solution on Sodic Soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 28(2):223-226.
137. Singh, J., and N. S. Randhawa. 1980. Boron Leaching and Regeneration Capacity in Saline Sodic Soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 28(3):307-311.

138. Singh, K. D. N., C. R. Prasad, and Y. P. Singh. 1986. Comparative Study of Pyrites and Sulphitation Pressmud on Soil Properties, Yield and Quality of Sugarcane in Calcareous Saline-Sodic Soil of Bihar. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 34:152-154.
139. Singh, R. B., P. S. Minhas, C. P. S. Chauhan, and R. K. Gupta. 1992. Effect of High Salinity and SAR Waters on Salinization, Sodication and Yields of Pearl-millet and Wheat. *Agric. Water Manage.* 21:93-105.
140. Singh, V. and S. P. Singh. 1983. Effect of Applied Boron on the Chemical Composition of Lentil Plants. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 31:169-170.
141. Síntesis de Recursos Hidráulicos. S. R. H. 1971. Presencia del Boro en las aguas negras de la ciudad de México. México.
142. Sposito, G. 1977. The Gapon and Vanselow Selecting Coefficients. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41:1205-1206.
143. Suarez, D. L. 1981. Relation Between pH<sub>c</sub> and Sodium Adsorption Ratio (SAR) and an Alternative Method of Estimating SAR of Soil or Drainage Waters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:469-475.
144. Suarez, D. L., J. D. Wood, and S. M. Lesch. 2006. Effect of SAR on Water Infiltration under a Sequential Reain-Irrigation Management System. *Agric. Water Manage.* 8:150-164.
145. Suyama, H., S. E. Benes, P. H. Robinson, S. R. Grattan, C. M. Grieve, and G. Getachew. 2007. Forage Yield and Quality under Irrigation with Saline-Sodic Drainage Water: Greenhouse Evaluation. *Agric. Water Manage.* 88:159-172.
146. Szabolcs, I. 1989. Salt Affected Soils. pp. 207-238. Cap 5. CRC. Press, Inc. Boca Raton, Florida
147. Tarchitzky, J., O. Lerner, U. Shani, G. Arye, A. Lowengart-Aycicegi, A. Brener, and Y. Chen. 2007. Water Distribution Pattern in Treated Wastewater Irrigated Soils: Hydrophobicity Effect. *Euro J. Soil Sci.* 58:573-588.
148. Tedeschi, A., and R. D. Aquila. 2005. Effects of Irrigation with Saline Waters, at Different Concentrations, on Soil Physical and Chemical Characteristics. *Agric. Water Manage.* 77:308-322.

149. Thayalakumaran, T., M. G. Bethune, and T. A. McMahon. 2007. Achieving a Salt Balance-Should it be a Management Objective?. *Agric. Water Manage.* 92:1-12.
150. Van Hoorn, J. W. 1971. Quality of Irrigation Water, Limits of Use and Prediction of Long Term Effects. pp. 117-135. *In: Irrigation and Drainage. Paper 7. Salinity Seminar. Baghdad. FAO. Rome.*
151. Velásquez M., M. A. 2001. Las variaciones de los procesos de adsorción de sodio en función de los diferentes valores de la relación de adsorción de sodio en las aguas residuales de la red hidrográfica de Zumpango-Ixmiquilpan, Valle del Mezquital, Hgo. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo Texcoco, Edo. de México.
152. Velásquez M., M. A., M., M. Ortega E., A. Martínez G., J. Kohashi S. y N. García C. 2002. Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Terra.* 20(4):459-464.
153. Verma, L. P. 1983. Tolerance of Wheat to Boron in Irrigation Water. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 31:167-168.
154. Wienhold, B. J., and T. P. Trooien. 1998. Irrigation Water Effects on Infiltration Rate in Northern Great Plains. *Soil Sci.* 163(11):853-858.
155. Wilcox, L. V., G. Y. Blair and C. A. Bower. 1954. Effect of Bicarbonate on Suitability of Water for Irrigation. *Soil Sci.* 77(4):259-266.
156. Zia, M. H., M. Saifullah, M. Sabir, A. Ghafoor, and G. Murtaza. 2007. Effectiveness of Sulphuric Acid and Gypsum for the Reclamation of a Calcareous Saline-Sodic soil under Four Crop Rotations. *J Agron. & Crop Sci.* 193:262-269.
157. Zuo, Y., L. Ren, F. Zhang, and R. -F. Jiang. 2007. Bicarbonate Concentration as Affected by Soil Water Content Controls Iron Nutrition of Peanut Plants in a Calcareous Soil. *Plant Physiol. and Biochem.* 45:357-364.